



Escola de Camins

Escola Tècnica Superior d'Enginyeria de Camins, Canals i Ports

UPC BARCELONATECH

Sistema de ayuda a la decisión para la explotación de un conjunto de embalses

Treball realitzat per:

Luis Gómez del moral Zaragoza

Dirigit per:

Manuel Gómez Valentín

Màster en:

Enginyeria de Camins, Canals i Ports

Barcelona, 21 de Juny de 2016

Departament d'Enginyeria Hidràulica, Marítima i
Ambiental

TREBALL FINAL DE MÀSTER

Treball Final de Màster
Enginyeria de Camins, Canals i Ports

Sistema de ayuda a la decisión para la explotación de un conjunto de embalses

Autor:
Luis Gómez del Moral Zaragoza

Tutor:
Manuel Gómez Valentín

Departament d'Enginyeria Civil i Ambiental
Escola Tècnica Superior d'Enginyeria de Camins, Canals i Ports de Barcelona
Universitat Politècnica de Catalunya

Juny 2016

A Dios,

A mi Familia,

A Ariane

“La gota de agua perfora la roca, no por su fuerza, sino por su perseverancia.”

Ovidio

AGRADECIMIENTOS

Quisiera agradecer en estas líneas, en primer lugar, al apoyo y ayuda de mi tutor Manuel Gómez, por su disponibilidad y atención en todas las fases del trabajo, siempre abierto a la escucha con la amabilidad que le caracteriza pese a multitud de agobios. No es de extrañar haber encontrado exalumnos, algunos ya bien antiguos, que le consideran el más entrañable de entre los profesores de la escuela.

Agradecer también la atención de Gonzalo Olivares y Xavier Sánchez-Vila, de la Universidad Politécnica de Cataluña, por sus intervenciones ocasionales de gran ayuda.

A José Miguel Diéguez, de SENER, y a Jaume Roquet, de ATLL, quienes también han orientado puntualmente el desempeño de este trabajo.

A la dirección del programa *HYDROEUROPE 2016*, por ofrecerme la posibilidad de formarme en la modelación hidrológica durante 3 meses en su programa con cobertura total de gastos.

A mis padres Luis y Montse, y mi hermana María, por ser y por sostenerme y aguantarme durante 6 años en mi escalada hacia el título de Máster.

A Ariane, por confiar en mí el proyecto de su Vida.

RESUMEN

En el presente trabajo se desarrolla una herramienta tipo SAD (Sistema de Ayuda a la Decisión) que tiene por objetivo dar soporte a la gestión y explotación de un conjunto de embalses. Ésta se fundamenta en un modelo hidrológico de aportación acoplado a una propuesta innovadora de metodología, desarrollada en estas páginas, para establecer previsiones cuantitativas del volumen embalsado en una ventana pronóstico de tres meses.

La estructura del trabajo consiste en dos grandes Capítulos. El primero, *Fundamento Teórico*, está dedicado a un análisis del estado del arte actual en cuanto a SIG (Sistemas de Información Geográfica), Modelación Hidrológica, herramientas SAD y el paradigma IWRM (del inglés, Gestión Integrada de Recursos Hídricos), así como los fundamentos conceptuales de la hidrología, de modo que toda persona pueda comprender el desarrollo del trabajo.

El segundo Capítulo, *Desarrollo Práctico*, expone la materialización de los conceptos previamente definidos, elaborando una herramienta SAD particularizada para el embalse de Siurana (el Priorat, Tarragona), describiendo el proceso, resultados y futuras líneas de mejora.

La metodología seguida para el desarrollo del modelo se corresponde con las últimas tendencias en cuanto a modelación hidrológica. Estos procedimientos se han aplicado sobre la serie de datos disponible para la cuenca de Siurana, consistente en 24 años de observaciones. La propuesta metodológica para elaborar pronósticos se fundamenta en simulaciones de Monte Carlo estratégicamente alteradas, obteniendo resultados de carácter estocástico.

Los resultados obtenidos muestran un éxito satisfactorio en las predicciones sobre el estado del embalse para la ventana de pronóstico validada. Se pronosticó para el 31 de mayo de 2016 unas reservas del 73% de recursos hídricos, frente al 75% real observado al finalizar el mes de estudio. La metodología propuesta de corrección continuada del modelo en base a las observaciones ha mostrado, por su parte, una reducción notable de la dispersión de los resultados, disminuyendo la incertidumbre del modelo y aumentando su confiabilidad. El trabajo termina con una propuesta de procedimiento para el desarrollo de nuevas herramientas SAD de gestión de recursos embalsados.

Las contribuciones originales han sido, en primer lugar, la propuesta de una primera metodología de cuantificación de la predicción estacional de AEMET (Agencia Estatal de Meteorología), que ha hecho posible obtener valores numéricos de volumen embalsado a partir de predicciones de carácter únicamente cualitativo. Por otro lado, el documento presente puede ser tomado como una primera guía para la modelación hidrológica y desarrollo de herramientas SAD, reuniendo los conocimientos y procedimientos actuales desde un punto de vista interdisciplinar e integrador. El carácter general de las metodologías aquí detalladas hace que por mimesis del presente documento puedan desarrollarse nuevas herramientas de gestión para cualquier embalse o sistema en explotación.

RESUM

En el present treball es desenvolupa una eina de tipus SAD (Sistema d'Ajuda a la Decisió) que té per objectiu donar suport a la gestió i explotació d'un conjunt d'embassaments. Aquesta es fonamenta en un model hidrològic d'aportació acoblat a una proposta innovadora de metodologia, desenvolupada en aquestes pàgines, per establir previsions quantitatives del volum embassat en una finestra pronòstic de tres mesos.

L'estructura del treball consisteix en dos grans Capítols. El primer, *Fonament Teòric*, està dedicat a una anàlisi de l'estat de l'art actual dels SIG (Sistemes d'Informació Geogràfica), Modelació Hidrològica, eines SAD i el paradigma IWRM (de l'anglès, Gestió Integrada de Recursos Hídrics), així com els fonaments conceptuals de la hidrologia, de forma que tota persona pugui comprendre el desenvolupament del treball.

El segon Capítol, *Desenvolupament Pràctic*, exposa la materialització dels conceptes prèviament definits, elaborant una eina SAD particularitzada per a l'embassament de Siurana (el Priorat, Tarragona), descrivint el procés, resultats i futures línies de millora.

La metodologia seguida per al desenvolupament del model es correspon amb les últimes tendències en quant a modelació hidrològica. Aquests procediments s'han aplicat sobre la sèrie de dades disponible per a la conca de Siurana, consistent en 24 anys d'observacions. La proposta metodològica per a elaborar pronòstics es fonamenta en simulacions de Monte Carlo estratègicament alterades, obtenint resultats de caràcter estocàstic.

Els resultats obtinguts mostren un èxit satisfactori en les prediccions sobre l'estat de l'embassament per a la finestra de pronòstic validada. Es pronosticà per al 31 de maig de 2016 unes reserves del 73% de recursos hídrics, en front al 75% real observat al finalitzar el mes d'estudi. La metodologia proposada de correcció continuada del model en base a les observacions ha mostrat, per la seva part, una reducció notable de la dispersió dels resultats, disminuint la incertesa del model i augmentant la seva confiabilitat. El treball termina amb una proposta de procediment per al desenvolupament de noves eines SAD de gestió de recursos embassats.

Les contribucions originals han estat, en primer lloc, la proposta d'una primera metodologia de quantificació de la predicció estacional de AEMET (Agència Estatal de Meteorologia), el que ha fet possible obtenir valors numèrics de volum embassat a partir de prediccions de caràcter únicament qualitatiu. D'altra banda, el document present pot ser pres com a primera guia per a la modelació hidrològica i desenvolupament d'eines SAD, reunint els coneixements i procediments actuals des d'un punt de vista interdisciplinari i integrador. El caràcter general de les metodologies aquí detallades fa que per mimesi del present document es puguin desenvolupar noves eines de gestió per a qualsevol embassament o sistema en explotació.

ABSTRACT

In the present document a DSS tool (Decision Support System) is developed with the aim of giving support to the management and exploitation operations of reservoirs. It is based on a hydrological model connected to an innovative methodology proposal, developed in these pages, to establish quantitative forecasts of the dammed volume in a forecast time window of three months.

The document is structured in two big Chapters. The first one, *Theoretical Basis*, is dedicated to a state-of-the-art analysis in GIS (Geographical Information Systems), Hydrological Modeling, DSS tools and the paradigm IWRM (Integrated Water Resources Management), as well as the conceptual foundations of hydrology, so that every person could understand the development of this work.

The second Chapter, *Practical Development*, exposes the materialization of the mentioned concepts, elaborating a DSS tool exclusive for Siurana's reservoir (el Priorat, Tarragona), describing the process, results and future lines of improvement.

The followed methodology for developing the model corresponds with the last trends as per hydrological modeling. These procedures have been applied on the available series of data for Siurana's basin, consisting of 24 years of observations. The proposed methodology to develop forecasts is based on strategically altered Monte-Carlo simulations thus obtaining a stochastic approach of the result.

The obtained results show a satisfactory success in the predictions on the reservoir state for the forecasted and validated time window. For May 31, 2016 it was predicted a 73% capacity of water resources, matching to the observed 75% once the month was over. The methodology proposed includes a continuous correction routine on the basis of the observed results, which has showed a notable reduction of the dispersion, diminishing the uncertainty of the model and increasing its reliability. The document ends with a proposal of procedure for the development of new DSS tools for dammed resources management.

The original contributions have been, firstly, the approach of a first quantification methodology of AEMET's seasonal prediction (State Agency of Meteorology), which has made possible to obtain numerical values of water resources departing from only qualitative predictions. On the other hand, the present document can be taken as a simple first guide for hydrological modeling and development of DSS tools, assembling the knowledge and current procedures from an interdisciplinary and integrative point of view. The general nature of the here detailed methodologies allow to imitate the present document in order to develop new management tools for any reservoir or system in exploitation.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

1.	Introducción	viii
2.	Objetivos.....	x
CAPÍTULO 1:		24
3.	Estado del Arte	25
3.1	Cronología de la modelación	25
3.2	La IWRM: Cambio de paradigma	26
3.3	Herramientas SAD.....	28
3.3.1	Modelos de simulación	29
3.3.2	Modelos de optimización	30
3.4	Aplicabilidad y viabilidad de los modelos para la gestión hídrica	31
3.4.1	Modelación a corto plazo	34
3.4.2	Modelación a largo plazo.....	34
3.4.3	España en la actualidad	35
3.4.4	El ejemplo de California	36
3.4.5	Sistemas existentes.....	37
3.4.6	Promoción de herramientas SAD.....	38
3.5	Síntesis.....	39
4.	Introducción a la hidrología	41
4.1	El ciclo hidrológico	41
4.2	La cuenca hidrográfica.....	43
4.3	El Hidrograma	44
4.4	El balance hídrico.....	46
5.	La modelación hidrológica	47
5.1	Sistemas de información geográfica	47
5.2	Modelos hidrológicos	49
5.3	Datos de entrada	54
5.3.1	La previsión meteorológica.....	56
5.4	Calibración y validación del modelo	57
5.4.1	Calibración	58
5.4.2	Validación	59
6.	Selección del Modelo.....	61
6.1	HEC-HMS	64

CAPITULO 2:	67
7. Estudio previo	68
7.1 La cuenca	69
7.1.1 El río	69
7.1.2 Pluviometría	69
7.1.3 Temperatura	75
7.1.4 Usos del suelo	76
7.1.5 Hidrología superficial	77
7.1.6 Hidrología subterránea	78
7.2 La presa	78
7.3 El embalse	79
7.4 Las poblaciones	81
7.5 Legislación vigente	82
8. Modelo topo-hidrográfico	83
8.1 Mosaico de mapas	84
8.2 Llenado de depresiones	84
8.3 Dirección del flujo	84
8.4 Acumulación de flujo	85
8.5 Red de flujo	86
8.6 Delimitación de las subcuencas	87
8.7 Estimación de parámetros topográficos	90
9. Modelo hidrológico	92
9.1 Modelado por procesos	93
9.1.1 Precipitación	95
9.1.2 Evapotranspiración	96
9.1.3 Intercepción-infiltración	99
9.1.4 Escorrentía superficial	109
9.1.5 Flujo base	117
9.1.6 Tránsito del hidrograma	120
9.2 Calibración del modelo	122
9.3 Validación del modelo	126
9.4 Discusión	127
9.5 Fuentes de incertidumbre	130
10. Modelo predictivo	132

10.1	Predicción estacional.....	132
10.2	Precipitación cualitativa de AEMET	133
10.3	Cuantificación de una previsión cualitativa	136
10.4	Validación de la previsión	145
10.5	Actualización de la previsión	147
11.	Propuesta de un procedimiento.....	152
12.	Futuras líneas de mejora	153
12.1	Concepción y el desarrollo del modelo.....	153
12.2	Modelo predictivo de cuantificación estacional	155
13.	Conclusiones.....	157
14.	Referencias	160

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Umbrales de explotación para el sistema Ter-Llobregat. Diéguez, J.M. (2009).	viii
Figura 2: Engranajes clave de una gestión integrada de recursos.	27
Figura 3: Principales focos de demanda a armonizar mediante una gestión integrada.	28
Figura 4: Características de un modelo de simulación: Interacción con el usuario.	29
Figura 5: Características de un modelo de optimización.	30
Figura 6: Esquema de interacción múltiple en el complejo marco de factores que influyen en la implementación de un modelo.....	33
Figura 7: El ciclo hidrológico del agua. Adaptación de Encyclopaedia Britannica (2008).	41
Figura 8: Identificación de las partes de un hidrograma tipo. Adaptado de Aparicio (2009).....	45
Figura 9: Localización y caracterización de la cuenca del río Siurana. Adaptación de ACCUA (2011).	69
Figura 10: Caracterización climatológica de la cuenca del Siurana. Adaptación de ACCUA (2011).	70
Figura 11: Precipitación media diaria en Cabacés, el Priorat. Adaptación de datos AEMET.....	71
Figura 12: Emplazamiento de los pluviómetros disponibles para el estudio.	71
Figura 13: Precipitación media diaria por meses durante los años 1984-2008 en la estación de Cornudella.	72
Figura 14: Precipitación media anual (mm) en Tivissa. Adaptación de ACCUA (2011).	73
Figura 15: Precipitación media anual en Cornudella.	73
Figura 16: Año 1984 reconstruido para Cornudella a partir de las series (de arriba abajo): Cabacés. Tivissa y Masroig. Precipitación media diaria.	74
Figura 17: Serie temporal de lluvia media diaria reconstruida en el pluviómetro de Cornudella.	75
Figura 18: Variabilidad espacial anual de la Temperatura, Precipitación y su Coeficiente de Variación. Adaptación de ACCUA (2011).	76
Figura 19: Usos del suelo en la Cuenca de Siurana, al nivel 3. Adaptado de CLC2000.....	76
Figura 20: Porcentaje de usos en la Cuenca de Siurana.	77
Figura 21: Evolución de las grandes cubiertas de suelo en los años 1993, 2000 y 2005 en la cuenca de Siurana. Datos de ACCUA (2011).	77
Figura 22: Estimación de la recarga en 3 subcuencas de la cuenca del Siurana. Adaptado de ACCUA (2011).	78
Figura 23: Serie temporal de entradas y salidas diarias al embalse de Siurana.	80
Figura 24: Evolución del nivel del embalse y volumen embalsado para la serie disponible de 1971 a 2008.....	80
Figura 25: Relación Volumen-nivel del embalse y ajuste polinómico de 6º orden.	81
Figura 26: Ubicación de los mapas MDE 5x5 descargados del ICGC.....	83
Figura 27: Algoritmo Flow Direction en un píxel. Adaptado de UPC.....	85
Figura 28: Mosaico bruto y dirección de flujo para el dominio de estudio.....	85

Figura 29: Red de flujo para distintos umbrales, de izquierda a derecha: 1%, 0.1% y 0.01% del total de área acumulada.....	87
Figura 30: Discretización de la cuenca completa del río Siurana en 179 subcuencas.....	88
Figura 31: Discretización de la cuenca vertiente al embalse de Siurana en 16 subcuencas.	88
Figura 32: Evolución del dominio de estudio. De izquierda a derecha: Mosaico inicial, Cuenca del río Siurana, Cuenca vertiente al embalse de Siurana.....	89
Figura 33: Comparativa del Barranc de la Foradada observado en <i>google maps</i> y obtenido mediante ArcGIS.	89
Figura 34: Izquierda: cauce más largo por subcuenca. Derecha: centroide por subcuenca.	90
Figura 35: Perfil del cauce principal de la cuenca W260.....	90
Figura 36: Usos del suelo de la cuenca asociada al embalse de Siurana. Adaptado de CREA.	91
Figura 37: Diagrama de flujo de los procesos hidrológicos a modelar.....	92
Figura 38: Esquematización de la cuenca del embalse de Siurana. Izquierda: ArcGIS. Derecha: HEC-HMS.	93
Figura 39: Temperaturas máxima y mínima diaria para el periodo 1984-2008.	98
Figura 40: Boxplot de temperaturas máximas por meses, 1984-2008.	98
Figura 41: Comparativa de temperaturas para dos ejemplos de año húmedo y seco.....	98
Figura 42: Esquema conceptual del modelo SMA. HEC (2000).....	101
Figura 43: Curva de relación ETR-almacenamiento para la <i>tension zone</i> . HEC (2000).....	105
Figura 44: Izquierda: Forma de la cuenca generalizada. Centro: forma generalizada del Tc. Derecha: relación normalizada tiempo-área. Hoggan (1997).....	112
Figura 45: Tiempos de concentración por cuenca. Comparativa gráfica.	115
Figura 46: Curva de relación área tiempo para las 16 subcuencas del ámbito de estudio para el embalse de Siurana, en base al hidrograma unitario sintético de Clark.	117
Figura 47: Explicación gráfica del modelo Lag. HEC (2000).	121
Figura 48: Precipitación y volumen embalsado.	123
Figura 49: Gráfico de convergencia para el volumen final acumulado.	124
Figura 50: Comparativa del volumen embalsado en función del tiempo. Datos observados y simulados.....	126
Figura 51: Comparativa del hidrograma de entrada al embalse. Datos observados y simulados.	126
Figura 52: Comparativa del volumen embalsado en función del tiempo. Datos observados y simulados.....	127
Figura 53: Comparativa del hidrograma de entrada al embalse. Datos observados y simulados.	127
Figura 54: Error relativo de las simulaciones y función ALD ajustada tras la calibración.	129
Figura 55: Comparativa de las observaciones y simulaciones. Izquierda: Calibración. Derecha: Validación.	129
Figura 56: Terciles de volumen trimestral precipitado en España, datos 1981-2010. AEMET (2016).	134

Figura 57: Previsiones de precipitación para el trimestre mayo-junio-julio de 2016. AEMET (2016).	135
Figura 58: Pluviogramas mensuales en Cornudella para los años 1984-2008. Valores diarios..	136
Figura 59: Pluviogramas mensuales promedio en Cornudella entre 1984 y 2008. Precipitación diaria.....	137
Figura 60: Precipitación media mensual para los años 1984-2008 en la estación de Cornudella.	137
Figura 61: Precipitación media trimestral mayo-junio-julio para los años 1984-2008.	138
Figura 62: Escenarios de precipitación en base a la previsión estacional de AEMET para el trimestre mayo-junio-julio de 2016. Precipitación diaria.	139
Figura 63: Resultados de la simulación de Monte Carlo en HEC-HMS para mayo-junio-julio 2016.	140
Figura 64: Extracciones diarias de recurso por meses para la serie 1984-2008.	141
Figura 65: Promedio diario de las extracciones por meses para la serie 1984-2008.....	142
Figura 66: Resultados de la simulación de Monte Carlo en HEC-HMS asumiendo una demanda media.....	143
Figura 67: Función de probabilidad acumulada e histograma de frecuencias asociados al volumen final pronosticado para el 1 de agosto tras simulaciones de Monte Carlo.	144
Figura 68: Evolución del volumen embalsado en Siurana. www.embalses.net	146
Figura 69: Función de probabilidad acumulada e histograma de frecuencia asociados al volumen final pronosticado para el 31 de mayo tras las simulaciones de Monte Carlo.....	146
Figura 70: Previsiones de precipitación para el trimestre junio-julio-agosto de 2016. AEMET (2016).	148
Figura 71: Escenarios de precipitación en base a AEMET para el trimestre junio-julio-agosto de 2016, actualizados con la validación del mes de mayo. Precipitación diaria.	149
Figura 72: Resultados de las simulaciones de Monte Carlo en HEC-HMS, actualizadas con la validación del mes de mayo.....	149
Figura 73: Función de probabilidad acumulada e histograma de frecuencias asociados al volumen final pronosticado para el 31 de julio, actualizados con la validación del mes de mayo.	150
Figura 74: Función de probabilidad acumulada e histograma de frecuencias asociados al volumen final pronosticado para el 31 de agosto.....	150
Figura 75: Mapa conceptual del procedimiento establecido en el presente trabajo.	152

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Ponderaciones del sistema. Plan Especial de Sequía de la Cuenca Mediterránea Andaluza (2007).....	ix
Tabla 2: Variables necesarias para la calibración, validación y explotación de un modelo hidrológico.....	55
Tabla 3: Valores referenciales para estadísticos mensuales recomendados en hidrología (Moriasi, 2007).	60
Tabla 4: Valores referenciales para el NSE (Molnar, 2011).	60
Tabla 5: Modelos hidrológicos actuales candidatos a participar en el proyecto.	63
Tabla 6: Pesos asignados a cada categoría para el análisis multi-criterio.	64
Tabla 7: Puntuaciones por categoría para cada modelo candidato.....	64
Tabla 8: Precipitación media diaria por meses para el periodo 1984-2008.....	72
Tabla 9: Distancias y factores de ponderación de las estaciones para la reconstrucción de la serie.	74
Tabla 10: Resumen de temperaturas estacionalmente para los años 1951 y 1999. Adaptado del Atlas Climático Digital de Cataluña.	75
Tabla 11: Características de los embalses de la cuenca de Siurana. ACCUA (2011).	78
Tabla 12: Estimación del volumen de agua por tipo de extracción para usos consuntivos. ACA (2007).	82
Tabla 13: Rango medio de temperatura mensual, 1984.2008.	99
Tabla 14: Parámetros del módulo SMA. HEC (2000).	106
Tabla 15: Estimaciones de almacenamiento superficial máximo. Chow (1962), Dunne (1978).	107
Tabla 16: Sensibilidad de los parámetros más relevantes previamente definidos sobre la infiltración.....	109
Tabla 17: Metodologías consideradas para la obtención del Tiempo de Concentración.	114
Tabla 18: Tiempos de concentración por cuenca según las formulaciones empíricas presentadas.	115
Tabla 19: Análisis de sensibilidad de los parámetros previamente definidos para la escorrentía superficial.	117
Tabla 20: Sensibilidad de los parámetros más relevantes previamente definidos para el flujo base	119
Tabla 21: Tiempos de retardo asociados a los cauces de tránsito.....	122
Tabla 22: Sensibilidad de los parámetros más relevantes para el tránsito del hidrograma.....	122
Tabla 23: Valores de los parámetros de las cuencas del modelo una vez realizada la calibración.	125
Tabla 24: Valores de los parámetros de los cauces del modelo una vez realizada la calibración.	125

1. Introducción

La marcada irregularidad hidrometeorológica de numerosas cuencas, y en particular las de extensión reducida, condiciona negativamente la gestión de los recursos hídricos embalsados. Este hecho se agrava cuando el sistema hidrológico es en sí deficitario. En estos contextos, la alternativa a la construcción de nuevas infraestructuras es una planificación exigente, ajustada y fiable de los recursos hídricos, con especial atención a la preservación de las garantías de abastecimiento.

Las funciones principales de los embalses requieren de una gestión conciliadora entre el almacenamiento de agua para satisfacer las demandas y la función de laminación de avenidas. Con este fin se establecen umbrales de seguridad que delimitan la zona de operación ordinaria, minimizando el riesgo de exceso o escasez de agua.

Con todo, una gestión excesivamente conservadora puede dejar un margen de operación en ocasiones muy reducido: aunque la definición de estos umbrales puede variar según patrones estacionales, generalmente se establecen de forma sistemática e invariante, lo que implica unos márgenes de seguridad holgados.

Ejemplo de ello son las cuencas internas de Cataluña, donde la franja de operatividad normal no alcanza el 50% de la capacidad total del embalse, ni en el mejor de los casos. En la Figura 1 se muestra a modo de ejemplo la definición de los umbrales para el sistema Ter-Llobregat:

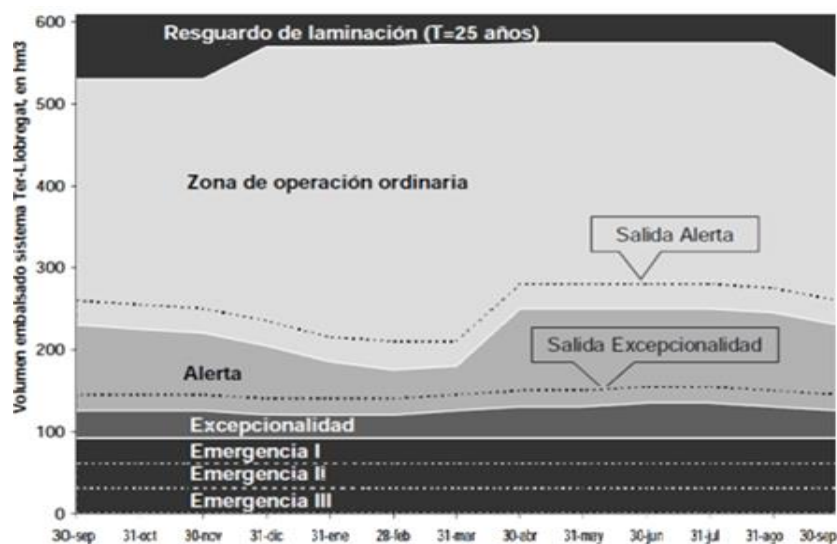


Figura 1: Umbrales de explotación para el sistema Ter-Llobregat. Diéguez, J.M. (2009).

Otro procedimiento que prescinde de los procesos hidrológicos reales es el método de indicadores de estado: se establecen unas magnitudes de interés a las que se asignará un índice adimensional entre 0 y 1 en función de su valor con respecto a la serie histórica. La evaluación de cada indicador y su ponderación final en base a observaciones históricas proporciona un indicador global del sistema, que sirve como criterio para lanzar las medidas oportunas. A modo

de ejemplo, se muestra en la Tabla 1 las ponderaciones de 4 indicadores para el sistema de Serranía de Ronda, Málaga:

Tabla 1: Ponderaciones del sistema. Plan Especial de Sequía de la Cuenca Mediterránea Andaluza (2007).

Subsistema	Embalses	Aforos	Piezómetros	Pluviómetros
I-1	1	-	-	-
I-2	-	1	-	-
I-3	0.6	-	0.4	-
I-4	0.65	0.1	0.25	-
I-5	-	-	0.5	0.5

Los indicadores mostrados en el ejemplo se obtendrían respectivamente en función del volumen almacenado en el embalse al inicio del mes, del caudal acumulado en los 6 meses anteriores (donde el valor mensual corresponde al promedio de una ventana trimestral), el nivel piezométrico presente en el acuífero, y la precipitación acumulada en los 6 meses anteriores.

La heterogeneidad e inconexión de los valores utilizados, así como la cuestionable calibración en base a series históricas puede no constituir una fiel reproducción del estado real del sistema. Además, las evaluaciones del estado se realizan de manera mensual, por lo que un evento intenso y típicamente breve podría entrañar peligros no contemplados. Tampoco se tiene en cuenta las previsiones meteorológicas futuras, ni los procesos hidrológicos que se dan en la cuenca. Esto último impide su flexibilidad a la hora de aplicarse en otras cuencas, dado que posiblemente los indicadores relevantes difieran en su tipología y ponderación.

En los escenarios irregulares y deficitarios, una gestión a la altura de las necesidades no debería contentarse con unos umbrales rígidos e inconexos con la realidad, que puedan desembocar en la aplicación de restricciones innecesarias u omisión de riesgos detectables con antelación.

Se pretende, pues, evolucionar de un sistema basado en tendencias históricas y evaluación de indicadores, a un sistema que tenga en cuenta los procesos físicos reales (evaporación, escorrentía, infiltración, desembalse, toma de agua, etc.) que ocurren en el sistema hidrográfico. De este modo, la evaluación del estado del embalse no provendrá de un ajuste histórico asociado a unos indicadores desconectados entre sí, sino que verdaderamente se simulará la respuesta hídrica de la cuenca en base a los datos reales y previsiones. Ello constituirá una herramienta de soporte a la toma de decisiones (SAD) que podrá ser análogamente desarrollada para cualquier embalse o sistema.

2. Objetivos

El objeto a desarrollar es una herramienta de soporte a la gestión de embalses fundamentada en un modelo numérico hidrológico y una metodología de previsión a medio plazo, pretendiendo aportar una visión estratégica enfocada a maximizar la garantía de suministro a todos los usos implicados y facilitar la consecución de los requerimientos ambientales. Se pretende obtener así un aumento de la capacidad de regulación con objeto de dar respuesta a las demandas de abastecimiento y al control del riesgo en un contexto de irregularidad climatológica creciente.

Para el desarrollo de la herramienta, se tiene en primer lugar el objetivo de esclarecer el estado del arte en este dominio, sentando las bases y fundamentos conceptuales de la modelación hidrológica. El documento elaborado servirá como guía práctica que reúna las principales tendencias y sobre la cual se puedan trabajar los nuevos avances en la materia.

Se propone que el modelo desarrollado tenga un carácter estocástico, esto es, que los resultados ofrecidos se proporcionen en términos de distribuciones probabilísticas, lo cual aportará mucha más información al operador que si de un dato determinístico se tratase. Ello se logrará mediante simulaciones de Monte Carlo para distintos escenarios de previsión meteorológica en base a la predicción estacional de AEMET. La propuesta consiste entonces en una metodología de cuantificación de dicha predicción, que en la actualidad se encuentra únicamente en términos cualitativos, junto con un procedimiento de validación y actualización continua de las previsiones. Este ensamblaje interdisciplinar permitirá reducir gradualmente la incertidumbre sobre el estado final del embalse tras la ventana de pronóstico trimestral.

El procedimiento a desarrollar podrá ser fácilmente sistematizado para agilizar su desarrollo y distribución hacia administraciones y empresas poco desarrolladas en este ámbito, que deseen incrementar su capacidad de regulación del recurso pero que no puedan permitirse nuevas inversiones en infraestructura. Un nicho de mercado puede encontrarse, por ejemplo, en países en vías de desarrollo.

El modelado de sistemas hidrológicos se enmarca, además, en concordancia con la tendencia global de gestión integrada de recursos hídricos (IWRM). Ésta continúa experimentando su auge como herramienta necesaria para la toma de decisiones en sistemas complejos, cuyas partes con intereses diversos demandan un único recurso hídrico, insuficiente mediante la gestión tradicional. La versatilidad de la modelación hidrológica permite además un desarrollo particularizado a las necesidades del potencial beneficiario.

Hasta donde se ha podido conocer, por el momento no existen grandes consultoras que ofrezcan este servicio de consultoría integrada en la modelización numérica hidrológica, puesto que ésta está aún experimentando su auge exponencial en los últimos años. Por lo tanto, el fin último del trabajo podría conducir a la instauración de una firma de consultoría en recursos hídricos que explote este nicho estratégico del mercado futuro.

CAPÍTULO 1:

Fundamento teórico

3. Estado del Arte

3.1 Cronología de la modelación

La modelación hidrológica consiste en la imbricación de distintos procesos físicos relacionados con el agua y su transporte natural de forma numérica en un sistema modelo, con el propósito de analizar su comportamiento, establecer criterios de diseño de obras hidráulicas y facilitar la gestión del escaso y valioso recurso del agua. Esta faceta de la ingeniería ha experimentado importantísimos avances en las últimas décadas, como fruto del desarrollo de la informática, la instrumentación y los métodos computacionales.

Tradicionalmente, las estructuras hidráulicas eran concebidas mediante la estrategia de prueba y error, dada la carencia de datos que permitiera determinar las solicitaciones hidráulicas esperables. No fue hasta finales del siglo XVIII que Chezy desarrolló la primera fórmula de fricción que se conoce para canales abiertos, expresión que permitía obtener la velocidad media (y por lo tanto, el caudal) en un canal de pendiente conocida en función del radio hidráulico y el coeficiente C de Chezy. La invención del pluviómetro y el inicio del registro de variables meteorológicas a partir del siglo XIX fueron decisivos para el estallido de la modelación hidrológica (O'Loughlin, G. et al, 2010).

Fue en 1850 cuando se presentó el Método Racional (Mulvany, 1851), una formulación empírica simple que relacionaba el pico del hidrograma con la lluvia que lo originaba, aplicable en cuencas pequeñas. De este modo apareció el primer modelo del proceso de transformación lluvia-escorrentía, y comenzó a utilizarse para dimensionar los drenajes de cuencas rurales y urbanas.

A su vez, el Método Racional sentó un precedente que fue continuado con muchos otros métodos:

- Fórmula de Talbot para la definición de curvas Intensidad – Duración – Frecuencia;
- Método del hidrograma unitario sintético de Sherman (1932);
- Método de infiltración de Horton (1933);
- Estudios sobre las trayectorias de Zoch (1934) y Clark (1945);
- Teoría general del hidrograma unitario de Dooge (1959);
- ...

Estos métodos fueron implementándose gradualmente en modelos matemáticos más complejos, como el Stanford Watershed Model IV (SWM-IV) de Crawford y Linsley (1966), para la evaluación de recursos hídricos a largo plazo, explotando la creciente capacidad computacional y la disponibilidad de información hidrometeorológica. Partiendo de los más

simples modelos lineales con parámetros concentrados, el desarrollo de este ámbito de la ingeniería ha conducido a la aparición de los más complejos modelos no lineales con parámetros distribuidos.

El crecimiento exponencial de las capacidades y aplicaciones de la modelación hidrológica computacional se dio en las últimas décadas del siglo XX con softwares tales como:

- KINEROS y KINEROS2 del Agricultural Research Service de los EEUU en 1960;
- SWMM de la Environmental Protection Agency de los EEUU en 1971;
- Tr55 del Soil Conservation Service de los EEUU en 1975;
- HEC-1 del Hydrologic Engineering Center de los EEUU en 1981;
- WASSP de la U.K. National Water Council en 1981;
- MOUSE de Danish Hydraulics Institute en 1996 ;
- SWAT del Agricultural Research Service de los EEUU en 2005;
- ...

En la actualidad, estas herramientas han resultado fundamentales para encarar los retos de una gestión y conservación de recursos de forma sostenible. Si bien su desarrollo aún no ha alcanzado sus máximas capacidades potenciales, numerosos beneficios ambientales, sociales y económicos ya se desprenden de la implementación de modelos hidrológicos.

Una de las grandes potencialidades de la modelación hidrológica es la capacidad de anticipar condiciones futuras del sistema hídrico. Esto puede ser obtenido mediante el trabajo conjunto de modelos hidrológicos y modelos de previsión meteorológica, lo que nos ofrece un tiempo de antelación aprovechable para gestionar las estructuras hidráulicas pertinentes que minimicen el riesgo en caso de crecida, o faciliten la toma de decisiones en materia de restricciones para casos de sequía.

A modo de ejemplo, se menciona la enorme ayuda que estos modelos aportaron en los años 2005-2008 para gestionar la sequía del sistema Júcar-Túria, proporcionando información sobre los riesgos anticipadamente y permitiendo justificar y facilitar la comprensión de las importantes medidas a tomar en dicha situación de crisis.

La modelación hidrológica es por lo tanto una herramienta reciente en la historia de la ingeniería, que ya está arrojando beneficios y que se encuentra en pleno crecimiento en cuanto a capacidades y potencialidades. Su alto grado de flexibilidad y conexión con otros modelos de cálculo, hacen de los modelos hidrológicos un instrumento estratégico y de un enorme atractivo en la actualidad.

3.2 La IWRM: Cambio de paradigma

Trascendiendo la simple modelación hidrológica, el inicio del nuevo siglo presenta una serie de nuevos retos en cuanto a la gestión hídrica. Los esfuerzos de los años de crecimiento y

desarrollo económico se centraron en la creación de nuevas fuentes de recursos hídricos y la construcción de instalaciones para el almacenamiento, la distribución y el tratamiento de aguas mediante la resolución de retos puramente ingenieriles y una gestión gubernamental centralizada.

Ahora, un cambio de paradigma está sucediendo desde el momento en que la curva de crecimiento tiende a estabilizarse. Como se remarcó en la Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Medio Ambiente (UNCED) en 1992, quedando recogido en el plan de acción universal “Programa 21”, en los años venideros los esfuerzos deben centrarse en el desarrollo y gestión sostenible de los recursos hídricos, la gestión de demandas, la consideración del medio ambiente, sostenibilidad a largo plazo, y las lecturas multisectoriales de los problemas hídricos desde una gestión participativa y mucho más local de las partes.

Nuevamente en el año 2000, la *Global Water Partnership* recuerda que la gestión de recursos hídricos debe llevarse a cabo como “un proceso continuo que promueva el desarrollo y gestión coordinado de agua, territorio y los recursos con ellos relacionados, con el objetivo de maximizar el bienestar económico y social de una forma equitativa, sin comprometer la sostenibilidad de los ecosistemas”.

A este proceso continuo e integrador se le conoce como IWRM (*Integrated Water Resources Management* o Gestión Integrada de Recursos Hídricos). El IWRM es un acercamiento al cruce sectorial de políticas, diseñado para remplazar la tradicional y sectorizada gestión de los recursos hídricos que nos ha llevado, en muchos casos, a un servicio pobre e insostenible del uso de los mismos. Esta nueva concepción se basa en el entendimiento de que los recursos hídricos son un componente integral del ecosistema, un recurso natural, y un bien social y económico. Así, podríamos decir que los objetivos principales son la eficiencia, la equidad y la sostenibilidad:



Figura 2: Engranajes clave de una gestión integrada de recursos.

La gestión integrada, así, requiere de unos pilares básicos para su completa implementación como herramienta exitosa en la gestión de los recursos hídricos: marco político/legal propicio, conocimientos y desarrollos técnicos necesarios, creación de consenso e igualdad participativa. Se puede decir que este cambio de paradigma se basa en orientar la manera en que las instituciones, organismos, ciudadanos y otros agentes participativos ven e intervienen en el uso de los recursos hídricos existentes. La visión política de la gestión hídrica tiene que pasar de una dimensión vertical a una de carácter transversal, mientras que la geográfica requiere de una aproximación a la gestión de forma inteligente, que como se desarrollará más adelante, consiste en una segregación territorial por cuencas y áreas metropolitanas.

Esta necesidad nace de la existencia limitada de recursos, de los que cada vez más agentes piden su parte (Figura 3): la coexistencia de diversos grupos de gestión en una misma región, el cumplimiento de las normativas, las necesidades ecológicas, hidrológicas, humanas, etc. Esta suma de factores, con intereses diversos, pero un único recurso, generan sistemas altamente complejos, que conllevan conflictos de igual importancia. Se requiere así de dosis de competencia técnica para superar la complejidad de los problemas, mientras que serán necesarias cooperación, coordinación y comunicación para superar los conflictos derivados.



Figura 3: Principales focos de demanda a armonizar mediante una gestión integrada.

3.3 Herramientas SAD

Este complejo contexto requiere de un análisis que permita la identificación, dentro de una gran cantidad de posibles alternativas, del conjunto de acciones que mejor se acomoden a los objetivos deseados, que se sintetizan en asegurar la disponibilidad de agua de calidad, cantidad y confianza dónde y cuándo sea requerida.

Analizando los principales factores a tener en cuenta en el análisis de sistemas aplicados a la gestión de recursos hídricos, tal y como se ha ido viendo, se destacaría:

- Aportación de agua (superficial, subterránea y sistemas no convencionales);
- Demanda de abastecimiento, producción de alimento y generación de energía;
- Variabilidad espacial y temporal de aportaciones y demandas;
- Requerimientos medioambientales;
- Marco político y legal.

Mientras los tres primeros factores son analizables desde una visión técnico-ingenieril más convencional, los dos últimos puntos requieren de una visión abierta a ambientalistas, a la tendencia política, la opinión pública... Se manifiesta nuevamente la necesidad de una gestión integradora.

Dado que la tarea integradora es frecuentemente asumida por los perfiles gestores del conjunto de fuentes de recurso, éstos requieren en mayor o menor medida de herramientas de apoyo para ejercer con criterio la toma de decisiones en cuanto a su reparto. De este modo, el análisis numérico y la propuesta de alternativas puede ser transferido a herramientas computacionales que ayuden a evaluar la bondad de las estrategias tomadas y aporten información valiosa para la gestión integradora. Estas herramientas son frecuente llamadas SAD (Sistemas de Ayuda a la Decisión). A continuación se dan unas breves nociones de los dos tipos de modelos que pueden convertirse en una herramienta SAD.

3.3.1 Modelos de simulación

De la dificultad de la toma de decisiones en sistemas complejos nace la voluntad de adaptar los modelos computacionales presentados en el apartado 3: *Estado del Arte*, junto con las crecientes bases de datos para el análisis de cuantos más factores posibles en la gestión de recursos hídricos. Con una visión holística, cumplen con el objetivo de mostrar cómo los elementos del sistema interaccionan entre ellos y con el medio, facilitando la elección de las mejores alternativas.

Sin embargo, los factores relativos a la percepción política y legal, a la priorización y a la opinión pública pueden no ser modelables, ya que suelen ser los factores de valoración con criterio humano en la toma de decisiones dentro del sistema. En ocasiones, no podrán englobarse dentro del modelo como una restricción o criterio matemático más. En esos casos se hablará de un modelo de simulación (Figura 4), al cual se deberán aplicar a posteriori las decisiones con criterio humano con el fin de delinear la mejor estrategia de gestión.

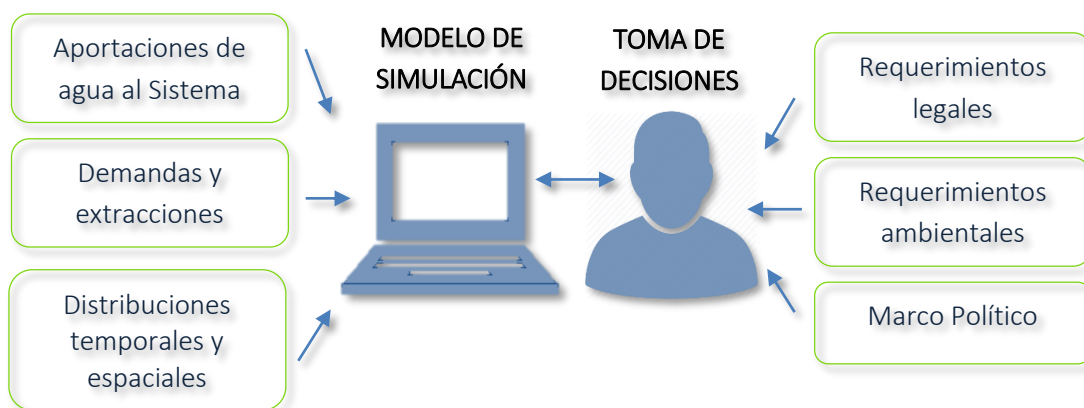


Figura 4: Características de un modelo de simulación: Interacción con el usuario.

Estos modelos son característicos de una zona concreta, al ser adaptados a las condiciones que imponen los inputs disponibles. Así, requieren una calibración y validación de la bondad de las simulaciones, quedando inequívocamente ligados a su lugar de implementación. Esto significa que el proceso de modelado, si bien puede generalizarse, éste siempre debe ser finalmente particularizado y diferenciado para cada lugar, partiendo de variables e hipótesis distintas.

3.3.2 Modelos de optimización

Los modelos de optimización incluyen, además de la simulación, una metodología para la asignación del recurso limitado a diferentes actividades en competencia, de la mejor manera posible. Se trata así de un modelo provisto de un proceso sistemático para hallar la mejor planificación, diseño, gestión u operación de alternativas mediante la generación de todos los escenarios y la ponderación de los resultados obtenidos. A diferencia de los modelos de simulación, por los cuales se nos muestra la respuesta e interacción de las partes de un sistema a un evento concreto, en los modelos de optimización se confía la elección de la estrategia de gestión más eficiente en términos de las condiciones y restricciones impuestas.

Recordando los tres principios de la IWRM podemos ver como estos modelos son perfectos para su aplicación, de manera objetiva y directa, y limitando conflictos entre agentes. Aplicando ponderaciones convenientes a los beneficios sociales y sostenibles del ecosistema, se trata de un método equitativo, eficiente y sostenible.

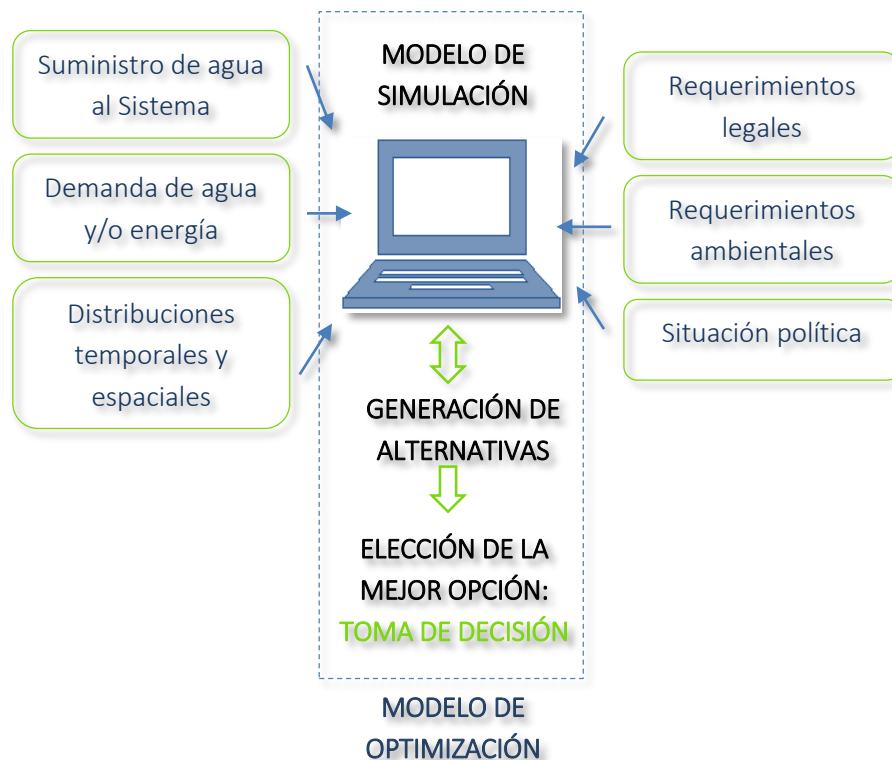


Figura 5: Características de un modelo de optimización.

Estos modelos suelen estar en la actualidad menos reconocidos y extendidos entre los encargados de la planificación y gestión de sistemas, que siguen confiando sus decisiones a la experiencia, desconfiando de procesos automáticos de optimización.

Las futuras mejoras en el mundo de la informática y un mayor conocimiento y confianza en dichos modelos pueden llevarnos a una forma global de gestión hídrica mucho más eficiente con respecto a todos los agentes interventores. Estudios actuales investigan, incluso, la implementación de inteligencia artificial, IA, en los modelos de optimización. Añadiendo una memoria de resultados y consecuencias a las decisiones tomadas, el propio modelo podría aprender de sus acciones pasadas, mejorando mediante la creación de experiencia real en una creciente red neuronal (Rani y Moreira, 2010).

3.4 Aplicabilidad y viabilidad de los modelos para la gestión hídrica

La posibilidad de la creación de un modelo para un sistema de recursos hídricos, aun así, no tiene de por sí un valor dado. Éste tiene que estar ligado a una aplicabilidad para la resolución de un problema y a su viabilidad.

- La aplicabilidad del sistema será demostrada en la medida en que existan datos cuantitativos del comportamiento del sistema en respuesta a una acción.
- La viabilidad del modelo puede resumirse a: ¿es el valor de la respuesta, hallada gracias al modelo, mayor que el coste de hallarla?

La viabilidad dependerá de la aplicabilidad del sistema y de los recursos necesarios para la implementación y el mantenimiento de un correcto modelo hidrológico: costes del sistema de instrumentación y monitorización, juntamente con la estructura de personal necesaria para su implementación, y el tiempo necesario para el mismo.

Una calibración continua ideal implica la necesidad de mediciones a tiempo real, o de lecturas con frecuencia de muestreo alta. Este proceso es costoso y debe llevarse a cabo durante toda la vida útil del modelo, lo que puede comprometer la rentabilidad del mismo, si se piensa en él como herramienta de negocio (J.Geta, 2010). La incertidumbre de los gastos generados puede ser un motivo por el cual empresas privadas rechacen la idea de aplicar modelos de este tipo.

Para un correcto análisis de viabilidad debe considerarse cuál es el valor añadido aportado por el modelo en cuestión, en relación a los métodos tradicionales alternativos. También influenciarán en su viabilidad otros factores, cómo cuál es el riesgo asociado al fallo (o mala gestión) del sistema, entre otros que irán desprendiéndose del presente trabajo.

Un ejercicio útil para estudiar la aplicabilidad y viabilidad en dichos usos es observar el uso real de los modelos: dónde y en qué se aplican en la actualidad, en qué medida, qué beneficios

proporcionan, etc. Se conocen multitud de aplicaciones, dentro y fuera de la mera gestión hídrica de recursos (Ich Hwan Ko, 2008):

- Modelos de operación de sistemas de embalse de agua;
- Modelos de predicción de inundaciones;
- Modelos de ondas de inundación;
- Modelos de la calidad del agua en embalses;
- Modelos de la calidad de agua en ríos;
- Modelos de sistema de acuíferos;
- Modelos de estuarios;
- ...

Incluso, se ha estudiado la aplicación de dichos modelos a la previsión de rotura de presas (Marín, 2006), la gestión de sequías para el suministro de agua o el control de sedimentos en los embalses (Artigas, 2015). De entre todas ellas, distinguimos dos grandes grupos, ya que sus aplicaciones, y por tanto su viabilidad, son muy distintas: modelos con previsiones a tiempo real y modelos con previsiones a medio y largo plazo.

Un aspecto de vital importancia para la viabilidad de los modelos de optimización es la calidad de las predicciones meteorológicas. Como se verá, una previsión meteorológica cuantitativa puede ser adecuada para simulaciones a muy corto plazo, mientras que previsiones a más largo plazo requerirán de otros métodos menos deterministas y de mayor incertidumbre. El clima cambiante a causa del calentamiento global genera además mayores incertidumbres respecto a los datos históricos. Sus consecuencias son entonces únicamente observables mediante modelos de simulación, y la gestión requerirá también de sistemas de optimización que tengan en cuenta dichos cambios. Será de vital importancia renovar los modelos de optimización deterministas que no incluyan dichas incertidumbres en sus cálculos. Se ha demostrado que procesos de programaciones dinámicas serán necesarios ya que proporcionan mejoras notables (Hejazi y Cai, 2010).

Una conclusión que parece clara al respecto es que el uso de datos hidrológicos como variables de estado en las funciones objetivo de modelos de optimización mejoran los resultados obtenidos por el embalse (Guibert et Al., 1995) (Labadie, 2004) (Hejazi et Al., 2008). Esto significa que los modelos son piezas indispensables en la generación de soporte a la toma de decisiones, como nexo indivisible entre las variables hidrológicas y sus efectos en la cuenca.

La mayoría de estos estudios, además, coinciden en que la escasa implementación de los modelos de optimización se basa, significativamente, en la falta de confianza entre los *decision makers* y el proceso de optimización. Enfatizan en que es necesario que los procesos de optimización permitan un acceso de sencilla comprensión a las simulaciones, y una alta interacción entre el usuario y el modelo para acrecentar la confianza en el mismo.

De la misma manera, se señala que aquellos embalses gestionados por empresa públicas presentan mayor dificultad en la implementación de este tipo de modelos, ya que muchas veces sus objetivos no se ven tan presionados hacia la eficiencia o la reducción de gastos, sino únicamente hacia evitar el colapso del sistema. No encontramos el mismo escenario en el caso de las agencias privadas o semiprivadas.

La multiplicidad de propósitos en la gestión de un embalse también empujará -gradual e inevitablemente- hacia el uso de dichos modelos, que gestionarán con simplicidad sistemas demasiado complejos para la integración de todos los factores (IWRM) de una manera convencional. Dicha multiplicidad conllevará además una necesaria colaboración y conciliación público-privada que acelerará a su vez el progreso.

En la Figura 6 se representan los principales condicionantes y factores a tener en cuenta para la aplicación viable de un modelo hidrológico como SAD:

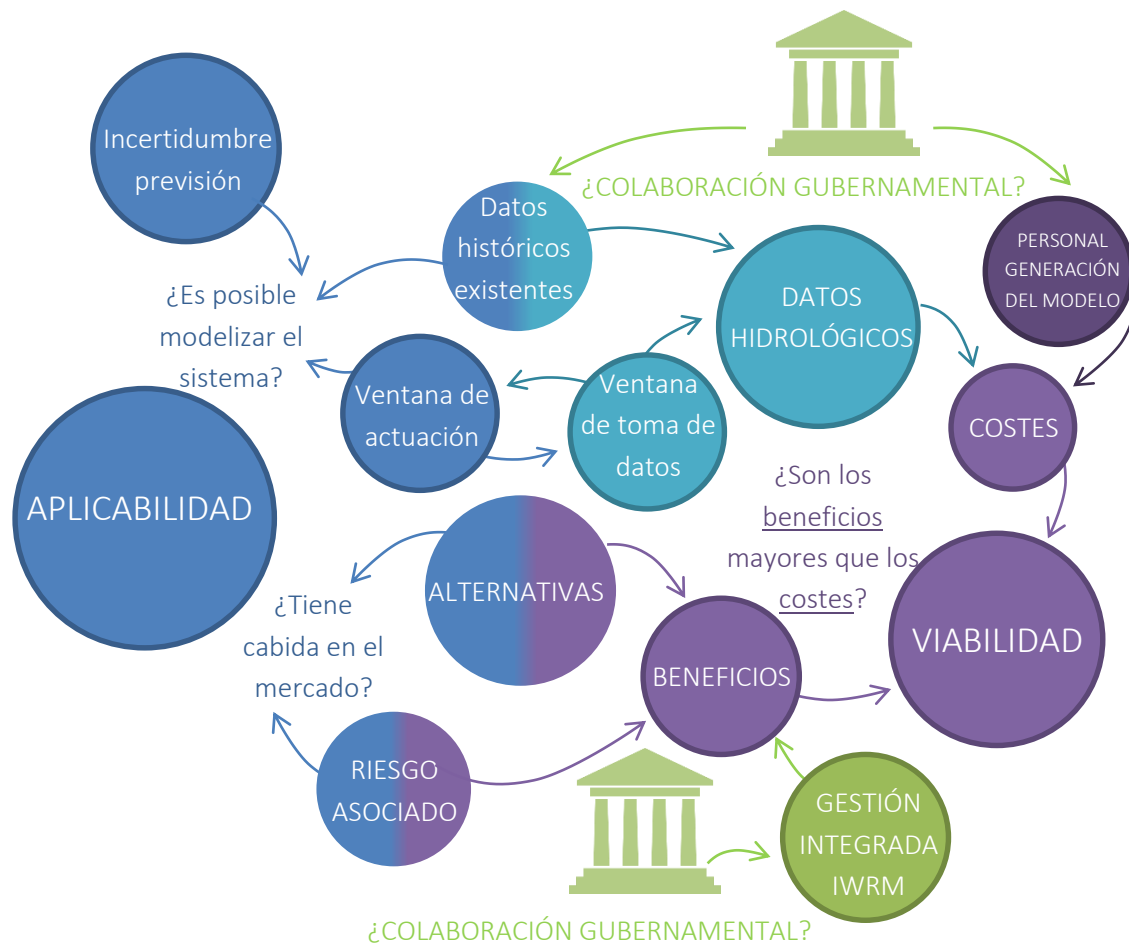


Figura 6: Esquema de interacción múltiple en el complejo marco de factores que influyen en la implementación de un modelo.

A continuación se dan breves nociones sobre los dos tipos de modelación mencionados en función de su ventana de pronóstico: modelación a tiempo real (corto plazo), y modelación a medio-largo plazo.

3.4.1 Modelación a corto plazo

Los modelos de simulación en tiempo real o a corto plazo destacan por su aplicabilidad real e inmediata. El paradigma de este grupo son los modelos de alerta temprana dedicados a la previsión de inundaciones. Dichos programas han demostrado su eficacia y son ampliamente aplicados, en parte, gracias a la confianza de las entidades gestoras en su correcto funcionamiento, pero también por la inexistencia de métodos alternativos para la previsión de inundaciones. La brevedad en el tiempo de actuación, la aleatoriedad de los sucesos causantes de avenidas y el alto riesgo asociado a ellas exigen herramientas que reproduzcan los potenciales efectos sobre la cuenca de manera exacta y rápida. Los modelos de simulación se adaptan a esta demanda y permiten completarla con escenarios de riesgos asociados y soporte a la toma de decisiones. Su aplicación real en prácticamente todo el mundo lo avala.

También se emplean modelos con predicciones a corto plazo en el ámbito de la irrigación en lugares con riesgo de sequías o con recursos hídricos insuficientes, donde una modelación de las condiciones del suelo y un pronóstico a tiempo real pueden ayudar a un mejor racionamiento del agua (Cabelguenne et al, 1997). El objetivo es evitar operaciones de regadío cuando las lluvias futuras o recientes lo permitan e intensificarlas cuando no se prevean eventos de precipitación. Dichas aplicaciones implican un riesgo casi nulo y una potencialidad de ahorro alta, por lo que la aplicación de modelos es rentable en aquellos lugares que se adapten a la descripción. Son de nuevo casos que exigen respuestas rápidas a sucesos aleatorios, de difícil previsión. La efectividad de estos modelos de previsión a corto plazo está completamente ligada a la bondad de las predicciones meteorológicas, que en la actualidad pueden ser aceptables en una ventana temporal de 10-14 días (AEMET, 2016).

3.4.2 Modelación a largo plazo

Gestionar un embalse implica decidir a quién y en qué cantidad se asigna un volumen determinado de agua, en detrimento de no poder almacenarlo para tiempos futuros o privando a otro demandante de esa porción de volumen. El riesgo de esta decisión reside en tomarla únicamente con la información del presente y/o predicciones a corto plazo únicamente. Se trata de una gestión mucho más estratégica, donde el amplio tiempo de previsión y el carácter no imperioso de la respuesta permite una toma de decisiones meditada, delineando por ejemplo estrategias paulatinas de restricción de consumos, u operaciones eventuales de mantenimiento del embalse.

En la actualidad, esta decisión se basa en el seguimiento reglado de una serie de curvas que estipulan las acciones a tomar en respuesta al estado del sistema. Estas curvas están típicamente construidas en base a un análisis histórico estadístico de fácil obtención y de

carácter generalmente conservador, de modo que se establecen indicadores que marcarán las estrategias de gestión del embalse.

Pese a ello, en el presente documento se ha hablado de las amplias posibilidades que sistemas de optimización, combinados con modelos de simulación, pueden añadir al sistema convencional de gestión de embalses. Las posibilidades son muy extensas y, sin embargo, dichos sistemas de ayuda a la toma de decisiones no están tan ampliamente extendidos. En este sentido, el impedimento principal de las simulaciones a medio y largo plazo es la elevada incertidumbre sobre la precipitación. En una ventana temporal extensa, las previsiones meteorológicas actuales no están a la altura de las necesidades, ni suficientemente capacitadas para dar las predicciones cuantitativas deseables como para confiar en los resultados.

Estos modelos de simulación pueden ser también aplicados a la investigación de problemáticas con resolución a largo plazo (meses o años). Estos estudios suelen realizarse con el fin de analizar escenarios futuros para la evaluación de recursos hídricos y de acciones a tomar en respuesta, así como la determinación de tendencias que apunten a una capacidad insuficiente de almacenamiento o un mal aprovechamiento del recurso potencial disponible. En la actualidad, esta inquietud suele venir motivada por los esperados cambios climáticos del caliente global. Son un ejemplo de ello los modelos utilizados en California o Corea del Sur.

Otro ejemplo de uso actual de modelos de simulación y optimización a largo plazo son los aplicados a acuíferos. Los resultados de la aplicación de modelos de gestión de acuíferos en el Estado de California han demostrado que éstos reducen el error de predicción, minimizan el riesgo de fallo en el sistema y mejoran las estrategias de gestión (Wei-Chen et Al, 2011). En este caso, las lecturas eran mensuales, y las previsiones se basaban en el bombeo de privados sobre el acuífero y sus efectos.

3.4.3 España en la actualidad

Desde que vio la luz el proyecto de los sistemas SAIH (Sistemas Automáticos de Información Hidrológica) en España, una de las prioridades del mismo fue servir como base para la ayuda a la toma de decisiones en situación de eventos hidro-meteorológicos severos.

Desde que se inició el proyecto en la década de los ochenta, se ha evolucionado tanto en los sistemas de adquisición de datos como en los modelos de previsión meteorológica, modelos de transformación lluvia escorrentía, modelos de fusión de nieves y modelos hidráulicos.

A modo de ejemplo, se cita brevemente el caso de la red HidroSur, que monitoriza la cuenca mediterránea andaluza. Se trata de una red de estaciones de medición de dos tipos de variables:

- Hidro-meteorológicas: precipitación, temperatura, niveles, caudales...
- Operativas: posiciones de compuertas, válvulas, régimen de bombeo, caudalímetros...

Estas variables se toman de 103 estaciones cada 5 ó 60 minutos según su necesidad, y son continuamente almacenadas. Ello permite una gran actividad de explotación de datos, generando informes mensuales y anuales, y posibilitan la generación de mapas de distribución de precipitación mediante SIG.

Además, a partir del modelo regional de predicción Hirlam de AEMET se poseen mapas de predicción de precipitación, temperatura, presión y nubosidad hasta con 72 horas de anticipación.

En colaboración con las Universidades de Málaga, Granada y Córdoba se ha desarrollado un SAD a partir de la conexión entre la red SAIH y el modelo hidrológico-hidráulico WIMMED. Ello permite tanto un conocimiento a tiempo real del estado de las cuencas de la Andalucía mediterránea, como un conocimiento predictivo de hasta 3 días vista en caudales, niveles y volúmenes embalsados.

3.4.4 El ejemplo de California

El estado de California, en Estados Unidos, es una de las regiones cuya gestión hídrica suscita más controversia. De sus recursos se nutren más de 30 millones de habitantes y se irriga más de 2.300.000 ha de cultivos. Es el sistema de recursos hídricos más grande y productivo del mundo, donde se gestionan más de 49.000 millones de m³ de agua al año (Hundley, 2001). Sus políticas en materia de agua son muy activas y cuentan con una alta implicación ciudadana.

Más de un 50% de los recursos del estado provienen de sus acuíferos y aguas subterráneas, que son de vital importancia. Con las sequías de los últimos años, la falta de deshielo para abastecer las presas de alta montaña y el aumento de población y consumo, los acuíferos se han visto sometidos a un aumento excesivo de su explotación, comprometiendo su mantenimiento y regeneración natural. Además, el cambio climático, y el respectivo aumento del nivel del mar, también comprometen la calidad de los mismos, temiéndose que el agua salada pueda infiltrar y contaminar los mismos.

El gobierno de California, mediante el *Water Plan* (2013), ha mostrado un interés central en la mejora de la gestión hídrica, apostando por el uso de modelos integradores para su gestión: *“El Estado incentivará a las agencias locales y regionales a desarrollar o adoptar herramientas de análisis para la modelación integrada de aguas superficiales y acuíferos, así como el análisis de escenarios para el asesoramiento de estrategias alternativas para la gestión como parte de las actividades planeadas del IRWM”* (DWC, 2013).

El estado abandera multitud de artículos científicos investigando la rentabilidad y eficiencia de modelos de simulación, y sus universidades son reconocidas en la materia. Se han publicado estudios sobre modelos de simulación y optimización para someter a prueba la estructura de gestión de los recursos hídricos del estado en conjunto, bajo escenarios de graves sequías prolongadas durante años, llegando a poder cuantificar sus efectos económicos, las medidas

requeridas de gestión, las implementaciones, los costes medioambientales y en agricultura, y sus potencialidades en recursos renovables (principalmente desalinizadoras y reutilización de agua) (Harou, 2010).

De la misma manera se han utilizado modelos para la particularización de la gestión de embalses. Estos estudios concluyen que los modelos de optimización, ligados a escalas de riesgo asociadas a datos estocásticos, se adaptan correctamente y salvan escenarios de sequías severas, mientras que la gestión actual, frente a los mismos escenarios, provoca una alta vulnerabilidad al colapso. Estos estudios sugieren, en concordancia con la tendencia del IWRM, el principio de flexibilizar las leyes y políticas estatales para poder intervenir en casos extremos, colaboración institucional para la gestión de recursos hídricos y la implementación de modelos integradores adaptativos junto con formación al personal para su uso efectivo.

3.4.5 Sistemas existentes

Tras un análisis de búsqueda de este tipo de herramientas a nivel mundial, a continuación se describen cuatro sistemas SAD de uso ya extendido, aplicados en distintas partes del mundo:

- EFFORTS

El SAD Efforts (European Flood Forecasting Operational Real Time System) se ha desarrollado en el marco del proyecto *“Real-Time Monitoring System for Optimal Computer Control of the Fuchun River Hydropower Station Reservoir”*, cuyo objeto es establecer una previsión y gestión óptima de un embalse del río Fuchun, en la República China. En la actualidad es utilizado en los ríos Reno y Po, en Italia. El sistema ha sido concebido para permitir la visualización de variables meteorológicas en tiempo real, pronóstico de avenidas y con la posibilidad de integrar un sistema de soporte a la toma de decisiones que evalúe los efectos de la inundación prevista.

- FEWS

El sistema de alerta temprana FEWS (Flood Early Warning System) de Delft Hydraulics ha establecido un nuevo estándar en Europa en cuanto a predicciones de avenidas. Ha sido implementado en los sistemas de alerta temprana de Inglaterra, Suiza y Holanda, e incorporado en otras aplicaciones en Alemania, Austria, y en el Joint Research Center (JRC) de la Comisión Europea. Su estructura permite incluir cualquier otro modelo hidrológico e hidráulico.

- EDIMACHI

EDIMACHI (Entorno de Desarrollo de Interfase Modular de Análisis y Cálculo Hidrológico) ha sido especialmente concebido para usarse en tiempo real con el fin de evaluar riesgos de crecida. A partir de éste pueden generarse nuevas aplicaciones, con una serie de posibilidades básicas como visualización y gestión de ficheros de almacenamiento.

- FLOOD WATCH

Flood Watch integra una amplia base de datos de series temporales, el sistema de modelación MIKE 11 FF (Flood Forecasting) consistente en un módulo de pronóstico de crecidas, y el sistema de información geográfica (GIS) de ArcView. MIKE 11 FF, desarrollado por DHI, incluye los procesos de generación de escorrentía en ríos y llanuras de inundación. Su integración en GIS genera una herramienta muy interesante para el pronóstico de crecidas y alerta temprana.

Estos y muchos otros modelos están básicamente enfocados a la gestión hidrológica de avenidas, cuya previsión es mucho más precisa. Las posibilidades de acople con modelos meteorológicos los hacen muy interesantes en este sentido, mientras que la previsión y gestión de sequías queda fuera de su alcance. Los esfuerzos en modelación deberían volcarse pues en este otro ámbito, siendo especialmente importante la mejora de los pronósticos meteorológicos a medio plazo, en ventanas de pronóstico semanales-mensuales.

3.4.6 Promoción de herramientas SAD

En las páginas anteriores se ha tratado de transmitir la concepción de que actualmente la modelización hídrica aplicada a los SAD se encuentra en un punto estratégico de su desarrollo. La necesidad de intervención de los modelos computacionales en la gestión de recursos hídricos se verá tarde o temprano satisfecha, cuando los SAD reciban aceptación y confianza por parte de los organismos gestores. Es por ello que se pretende hacer un llamamiento a la investigación y desarrollo sobre este ámbito, de modo que se esté preparado en conocimiento y medios para dicho momento. La entidad que se encuentre a la altura de las necesidades cuando estalle el auge de los modelos hidrológicos a medio plazo como herramienta de gestión verá ampliamente retribuidos sus esfuerzos tras este ineludible desenlace.

El gobierno debe entender, como ilustra el ejemplo de California descrito en el apartado 3.4.6, la necesidad de implementar modelos de simulación, sus beneficios a corto y largo plazo, y su vital importancia en la gestión integrada de los recursos hídricos del país. Como ya se ha comentado en este apartado de presentación de la IWRM, el aprovechamiento sectorizado de los recursos crea conflictos entre las partes, y los agentes sin representación o poder económico (principalmente agricultura y medioambiente) no quedan representados en la lucha participativa. El gobierno debe alzarse en defensa de dichos agentes como mediador de las partes (directamente mediante el ministerio correspondiente o indirectamente mediante la contratación de empresas gestoras), pero muchas veces cuenta únicamente con las legislaciones y ayudas económicas como sanción/premio al mal/buen uso de la integración.

La implementación de modelos de simulación puede ser una ocasión propicia para participar más activamente en defensa de dichos agentes. La generación de bancos de datos para su uso en modelos de simulación puede ser la llave para exigir una participación equitativa de las partes o, incluso, trabajar como mediador y parte de la mesa de los *decision makers* del recurso. Así, estos datos, además de un bien público para la investigación, pasan a tener un valor añadido como materia prima necesaria para los modelos hídricos del futuro.

A cambio de la financiación de las campañas de obtención y validación de datos, el gobierno puede exigir una colaboración entre agentes para integrar los intereses públicos (medidas ambientales, protección frente avenidas, etc.) y privados (maximización de las garantías de recurso). Esta colaboración generará, además, un ambiente participativo que puede llevar a un mejor entendimiento de los intereses comunes y particulares, y al respeto de los recursos hídricos como fuente valiosa para el bien común.

3.5 Síntesis

En resumen, la aplicabilidad y viabilidad de los modelos de simulación en la gestión de recursos hídricos dependen bidireccionalmente entre sí, y obedecen a una serie de factores particulares para cada sistema. Ello significa que se deberá estudiar la viabilidad y aplicabilidad de cada modelo de manera independiente, sin ser posible garantizar de antemano que todos los modelos de simulación/optimización sean de por sí rentables. El esquema anterior (Figura 6) muestra las relaciones entre los factores principales y orienta cuáles deberían ser las preguntas a responder a la hora de cuestionarse la viabilidad de un modelo.

La aplicabilidad será posible en la medida en que el modelo sea realizable y responda a una necesidad real del mercado. Por realizable se entiende que se dispongan de los datos históricos necesarios y en la distribución temporal requerida según la ventana de actuación deseada. Además, en cuanto a las previsiones futuras, se deberá estudiar en qué medida la incertidumbre de dichas predicciones, si existieran, se adapta a las necesidades de modelación.

Por otra parte, el modelo tendrá cabida en el mercado siempre que no exista otro producto alternativo que cubra o supere su función con coste igual o menor. Se ha visto también que la sensación de riesgo asociada al fallo del sistema (avenida o sequía, por ejemplo) es un factor importante para la búsqueda de mejoras en la gestión del mismo. Actualmente, el valor añadido de los modelos es la falta de alternativas eficientes para la gestión de un recurso hídrico. A esto deberá acoplarse un mayor control de la incertidumbre, lo que comportará las claves indispensables para el éxito en el mercado.

En cuanto a la viabilidad, ésta será mayor cuanto mayor sea el beneficio proporcionado por el modelo, frente a los costes generados. Es importante destacar que los beneficios pueden no ser meramente económicos, sino implicar ámbitos sociales, ambientales, equitativos, etc. De la misma forma, el mero inicio de considerar e intentar materializar una gestión integrada ya implica de por sí un beneficio, puesto que ello sentará las bases del nuevo cambio de paradigma y permitirá su desarrollo. Estos motivos deberían ser suficientes para la implicación por parte de los gobiernos e instituciones públicas en el fomento y participación de dichas herramientas.

En cuanto a los costes, éstos constan básicamente de dos grandes bloques: los datos hidrológicos (instalación de equipos, toma de datos y mantenimiento) y el personal necesario

para la creación y utilización del modelo. Mientras que el personal representa un gasto asumible, el coste de la obtención y mantenimiento de los datos hidrológicos requeridos por el modelo puede ser elevado, tanto en equipos de medición como en tiempo de espera mientras se recoge una cantidad de datos aceptable (que debería ser del orden de años). Esto dependerá de la ventana temporal requerida y de la calidad espacial de los datos necesarios, que a su vez vendrá marcado por el tipo de modelo, su uso y las características del sistema. La colaboración de las autoridades y organismos gestores en cuanto a la facilitación de datos será clave para garantizar un coste asumible tanto económico como temporal, siendo este último el más restrictivo actualmente para la modelación hidrológica.

4. Introducción a la hidrología

4.1 El ciclo hidrológico

Antes de comenzar con la modelación hidrológica de una cuenca, se desea exponer una presentación de los procesos que integran el ciclo hidrológico del agua. Este ciclo engloba distintos procesos físicos de forma continua e interrelacionada que transfieren el agua en el espacio y en el tiempo sobre la superficie del terreno y sus masas de agua, a través del subsuelo y en la atmósfera.

Se presenta un esquema de los distintos fenómenos que toman parte de este ciclo, y que deberán ser caracterizados para el correcto balance hídrico y modelado de la cuenca (Figura 7):

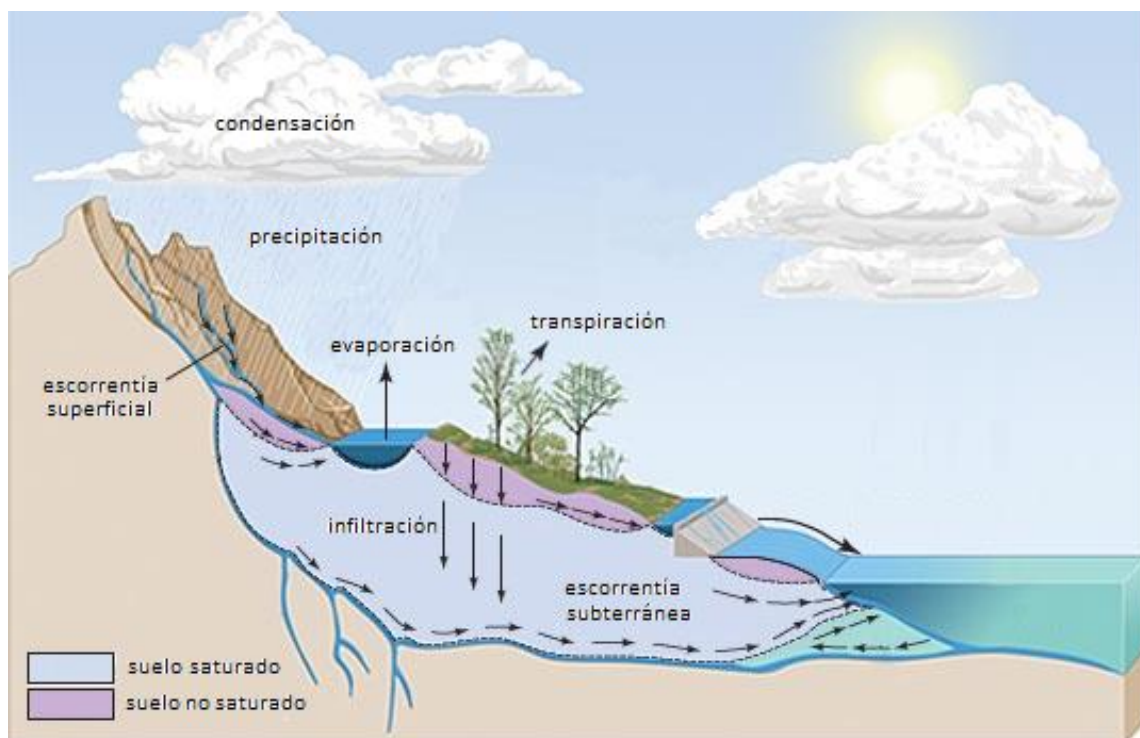


Figura 7: El ciclo hidrológico del agua. Adaptación de Encyclopaedia Britannica (2008).

De manera sucinta se describen dichos fenómenos:

- **Precipitación:** Puede considerarse como el inicio de este proceso cíclico. El vapor de agua existente en la atmósfera experimenta una condensación cuando el aire se satura de humedad y se presentan zonas de bajas temperaturas en la altura. Así, las microgotas comienzan a agregarse entre sí, aumentando su tamaño sobre los “núcleos de condensación” hasta el punto en que la sustentación del aire sobre las partículas es vencida por el propio peso de las mismas, precipitando sobre el terreno.

- **Interceptación:** Durante el evento de precipitación, una pequeña fracción del agua queda retenida en la cobertura vegetal del terreno (copas de los árboles, arbustos y plantas), hasta que la capacidad de interceptación se ve colmatada. A partir de ese momento, el resto de la precipitación alcanzará la superficie del terreno y continuará su ciclo hidrológico. Paralelamente, el agua interceptada sobre la cobertura vegetal será más propensa a la evaporación, cerrándose así el ciclo hidrológico para esta pequeña parte del agua.
- **Evaporación:** Cuando la energía cinética de las moléculas de agua líquida en superficie excede el trabajo de cohesión aplicado por la tensión superficial del agua, las moléculas pasan a estado gaseoso: se evaporan. Así, una parte del agua precipitada puede ser devuelta directamente a la atmósfera, cerrando el ciclo. Esta extracción de agua del sistema a estudiar puede suceder en cualquier fracción de agua en contacto con el aire, esto es: océanos, lagos, ríos y suelos no saturados.
- **Transpiración:** En las plantas, el agua que llega a las hojas y no es utilizada para realizar la fotosíntesis pasa a la atmósfera en forma de vapor, lo que se conoce como transpiración vegetal. Es difícil distinguir la transpiración de la evaporación proveniente del suelo, por lo que frecuentemente suelen agruparse en un solo término llamado evapotranspiración.
- **Acumulación superficial:** Parte del agua precipitada puede quedar retenida en la propia superficie del terreno. El agua interceptada puede sufrir procesos de evaporación, infiltración al suelo, escorrentía o simple almacenamiento superficial, dependiendo de características como el tipo de suelo, su contenido de humedad, la topografía, las condiciones meteorológicas, etc.
- **Infiltración:** Generalmente, la primera fracción del agua precipitada y no interceptada en la cubierta vegetal penetra a través de los poros del terreno y pasa a ser subterránea. La fracción infiltrada del agua varía en función de la permeabilidad del terreno, de la pendiente y de la cobertura vegetal. Parte del agua infiltrada vuelve a la atmósfera por evapotranspiración, bien a través de las plantas o bien por contacto directo con el aire. Otra parte puede fluir sub-superficialmente hasta alcanzar un punto de surgencia a la superficie (manantial) o formar parte del aporte a un cauce fluvial. Finalmente, la parte restante percolará descendiendo hacia capas más profundas, hasta encontrar una región de terreno menos permeable (aquitardo) o impermeable (aquicludo), formando un acuífero o incorporándose a uno existente.

- **Escorrentía superficial:** El volumen de agua no infiltrado en el terreno circulará sobre la superficie en sentido de máxima pendiente hasta hallar una zona de remanso o aguas tranquilas. Hasta entonces, los caudales superficiales de escorrentía irán confluyendo en zonas de preferencia por condiciones topográficas, formando torrentes y ríos. Éstos se combinarán con otras incorporaciones hasta alcanzar el punto final de desagüe de la cuenca considerada.
- **Escorrentía subterránea:** El volumen de agua infiltrado al terreno circulará también, aunque a una velocidad mucho menor. La dirección de escorrentía subterránea puede ser distinta de la superficial; ésta depende de la presencia, orientación y permeabilidad de los estratos subterráneos. El agua de recarga al acuífero puede retornar a la superficie, constituyendo en ocasiones el flujo base que se incorpora a los cauces fluviales. Este proceso puede darse simultáneamente a distintas velocidades según las características de los estratos del terreno.
- **Acumulación en el embalse:** cuando una infraestructura civil de almacenamiento interrumpe el flujo natural de las aguas, produce una zona de acumulación que puede aprovecharse para su posterior explotación, generando un embalse. El embalse puede recibir tanto aportaciones como pérdidas de distintas procedencias: superficiales, subterráneas y antrópicas.

El ciclo hidrológico prosigue con la secuenciación de éstos y otros procesos hasta cerrarse y recomenzar, alcanzando en muchas ocasiones la descarga al mar. Dadas las motivaciones del presente trabajo, se consideran suficientes los procesos aquí expuestos para la correcta comprensión del estudio.

En resumen, el caudal observado en un punto determinado de la cuenca, como puede ser un embalse cuya gestión se pretende mejorar, se constituye mediante la agregación de caudales que provienen de la escorrentía superficial y subterránea tras haber sufrido los distintos procesos de transformación y pérdida precedentes. Los tiempos de tránsito y el almacenamiento temporal durante los procesos físicos indicados también conforman el aspecto del hidrograma de salida de la cuenca.

4.2 La cuenca hidrográfica

La cuenca hidrográfica es una unidad natural asociada a su punto de salida. Se define por unos límites correspondientes a líneas divisorias de aguas superficiales, de modo que el agua que precipita sobre dicha superficie y es transformada en escorrentía, será evacuada por un único punto de salida aguas abajo. Esta divisoria es el lugar geométrico de los puntos de mayor altura

relativa entre dos laderas adyacentes pero de exposición opuesta, lo que provoca la separación de la escorrentía hacia dos cuencas distintas.

Por motivos evidentes, resulta práctica la gestión de los recursos hídricos mediante la segregación del terreno en cuencas hidrográficas, de modo que los procesos internos no interfieren entre ellas. En este sentido, España fue pionera en el mundo al instaurar un modelo de gestión por cuencas hidrográficas a principios del siglo XX. En particular, la Confederación Hidrográfica del Ebro fue constituida por el Real Decreto de 5 de marzo de 1926, siendo la primera institución creada en el mundo con el objetivo de gestionar integralmente el ámbito de una cuenca hidrográfica. Este concepto fue reafirmado posteriormente a nivel europeo por la Directiva Marco del Agua en el año 2000, que estableció la necesidad de una gestión basada en la segmentación del espacio en cuencas hidrográficas.

El concepto de cuenca hidrográfica suele ir asociado a un punto de vertido al mar. Sin embargo, y salvando el abuso de lenguaje, el concepto es ampliable a cualquier punto de la superficie terrestre. Así, podemos definir la cuenca asociada a, por ejemplo, un punto en un río, que a su vez está formada por múltiples subcuencas asociadas a cada uno de sus afluentes. De este modo, sobre cualquier punto del terreno puede trazarse su cuenca hidrográfica aportante, entendida como la región del terreno que contribuye al aporte de agua en el punto objetivo.

Este punto objetivo puede tomarse según los intereses del estudio; por ejemplo, si tomamos como punto la desembocadura de un río, obtendremos la cuenca hidrográfica completa del terreno que acaba desembocando a ese punto de la costa. En el caso que concierne el presente trabajo, el punto tomado será el lugar geográfico del embalse, de modo que obtenemos el área del terreno que aportará recursos hídricos superficiales a dicho embalse.

La cuenca hidrográfica está formada por elementos dependientes entre sí, existiendo una fuerte interacción entre sus condicionantes hidro-meteorológicos, los habitantes que se benefician de ellos y las actividades desarrolladas en su interior. Gestionar correctamente este sistema pasa por considerar cualitativa y cuantitativamente la disponibilidad de recursos, el volumen y características de la demanda, y las consecuencias de cada decisión tomada, no de manera localizada sino más bien mediante un juicio global de la cuenca.

4.3 El Hidrograma

Dado un punto del terreno al cual se le asocia una cuenca hidrográfica, la variable más interesante en cuanto a gestión de recursos, riesgos e infraestructuras es el caudal circulante a lo largo del tiempo, recibiendo el nombre de hidrograma. Tanto es así que Chow (1959) se refirió al hidrograma como la expresión integral de las características fisiográficas y climáticas que rigen las relaciones entre la lluvia y la escorrentía de una cuenca.

Los hidrogramas, pese a presentar características muy diferentes entre ellos, presentan todos elementos comunes que pueden ser identificados sin importar la topografía y características meteorológicas que lo producen. Según Aparicio (2009) estos elementos son (Figura 8):

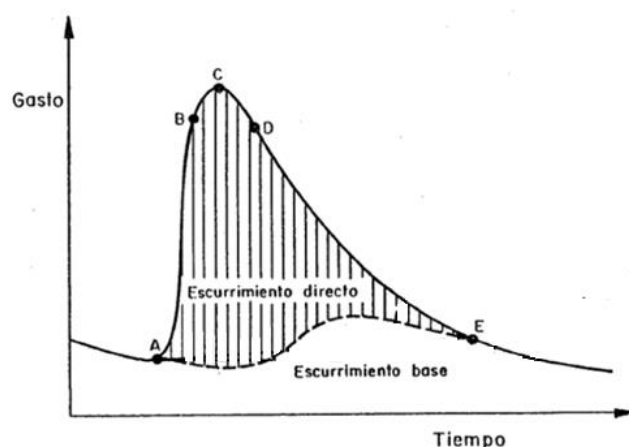


Figura 8: Identificación de las partes de un hidrograma tipo. Adaptado de Aparicio (2009).

- **A: Punto de levantamiento:** es el instante del tiempo en que los primeros volúmenes de agua precipitada alcanzan la salida de la cuenca, y el caudal circulante comienza a incrementarse con respecto al caudal que existía previo a la precipitación (caudal base).
- **C: Pico del hidrograma:** es el valor máximo de caudal alcanzado durante o después de la tormenta. Es común que éste sea el elemento más importante y significativo del hidrograma en términos de riesgo y diseño de obras hidráulicas.
- **D: Punto de inflexión:** Una vez se ha producido la salida del agua más inmediata, en la cuenca permanecen volúmenes circulantes en los cauces y en el subsuelo, cuya salida se ve más retardada, formando una cola que hace conferir al hidrograma la típica distribución asimétrica de caudales en el tiempo.
- **E: Fin de la escorrentia directa:** En adelante, el caudal observado a la salida provendrá principalmente de los niveles freáticos subterráneos que aportan agua a los cauces o a la propia salida de la cuenca. En función de la permeabilidad del suelo, este proceso puede alargarse por mucho tiempo, manteniendo el cauce lleno a la salida de la cuenca aún semanas después del último evento de precipitación.
- **T_p : Tiempo al pico:** es la distancia temporal entre el punto de levantamiento y el pico del hidrograma.
- **T_b : Tiempo base:** es la distancia temporal entre el punto de levantamiento y el fin de la escorrentia directa.

4.4 El balance hídrico

Junto con el hidrograma, la herramienta básica para la correcta gestión de los recursos hídricos consiste en realizar un balance, esto es, la cuantificación de los volúmenes de entrada, salida y almacenamiento en el sistema hídrico, y su interrelación entre ellos. Ello comporta un diagnóstico de la disponibilidad de agua en la región de la cuenca para evaluar las fuentes de aportación y los focos de salida del recurso, así como la capacidad de almacenamiento en su interior. Ello permitirá tomar medidas y establecer estrategias para preservar el recurso y utilizarlo integradamente de modo que se garantice su calidad y cantidad.

De forma resumida, el balance hídrico contiene tres términos: el volumen de entrada, el de salida, y el almacenado, todos para un mismo paso de tiempo:

$$V_{in} - V_{out} - V_{stored} = 0$$

Los procesos hidrológicos previamente descritos juegan un papel en este balance que debe ser determinado a priori, y que no siempre se conservará en el tiempo: en ocasiones un acuífero será efluente (ganador de agua), y en ocasiones influyente (perdedor de agua). Otros procesos, como la lluvia o la demanda de recurso, siempre contribuirán a un único término del balance hídrico.

La gran mayoría de los modelos de cálculo hidrológico a medio y largo plazo se basan en el balance hídrico de los recursos de la cuenca, simulando de una forma u otra los procesos anteriormente mencionados. Una vez caracterizadas las aportaciones y extracciones de agua en el sistema, puede delinearse un plan de gestión para la preservación o maximización de sus beneficios, así como evaluar las consecuencias de las medidas a tomar para caracterizar su bondad y justificar su implementación. Estas acciones pueden ser fácilmente realizadas modificando intencionadamente los términos del balance hídrico y estudiando los nuevos resultados obtenidos.

5. La modelación hidrológica

En este apartado se pretende realizar un examen exhaustivo de la situación actual en cuanto a procedimientos de modelado hidrológico. El objetivo es comprender el estado del arte en este ámbito, evaluar las aportaciones y carencias de cada método y escoger los más apropiados para el fin del presente trabajo.

5.1 Sistemas de información geográfica

La mejor herramienta virtual en la actualidad que permite gestionar datos topográficos de gran volumen a gran velocidad y de manera georreferenciada es el uso de Sistemas de Información Geográfica (SIG o GIS por sus siglas en inglés).

Estos sistemas permiten sentar una primera base de trabajo para desarrollar los modelos hidrológicos, así como la integración posterior de los resultados en un sistema de prevención hidrológica que posibilite el pronóstico de inundaciones y la correspondiente toma de decisiones. Estas recientes herramientas son en sí un instrumento que ofrece la posibilidad de dar respuesta a cuestiones relacionadas con la distribución espacial y temporal de la escurrentía.

Los SIG facilitan el tratamiento de la información hidrológica a través de sus funcionalidades, que permiten integrar procesos de captura, almacenamiento, manipulación, análisis, modelación y presentación de datos georreferenciados. La ayuda de los SIG ha permitido una cuantiosa aceleración de los progresos de la modelación hidrológica en cuanto a su desarrollo y aplicación, pudiendo actuar a modo de plataforma para la experimentación, a la vez que sus resultados pueden ser incorporados al proceso de toma de decisiones y en la ordenación del territorio.

Su gran versatilidad y las ventajas de implementar estos sistemas han hecho que el uso de sistemas SIG en la gestión de los recursos hídricos se haya visto también incrementado en los últimos años, como herramienta implementada en proyectos de aprovechamiento, utilización y prevención, con diferentes usos, desde consumo humano hasta diseño de embalses.

La conexión entre los SIG y los modelos hidrológicos ha experimentado una lógica progresión en la última década. Los SIG comenzaron a utilizarse de manera aislada a los modelos, explotando únicamente sus funciones de regionalización, cálculo y caracterización de parámetros topográficos, establecimiento de topologías espaciales, etc. El siguiente paso consistió en la inclusión de dicha información en los modelos hidrológicos como punto de partida para las simulaciones. Actualmente, esta conexión se ha vuelto mucho más profunda, existiendo aplicaciones que permiten el trabajo conjunto y biunívoco entre herramientas SIG y modelos

hidrológicos/hidráulicos como son las herramientas HEC-GeoHMS y HEC-GeoRAS. Los últimos avances consisten en una integración completa de interfaces SIG e hidrológicas, como es el caso de GISPLANA del CEDEX, que integra el sistema ArcView 3.2 con un modelo matemático externo. De entre las múltiples herramientas SIG destaca, tanto por su funcionalidad como por la gran extensión de su uso, el software ArcGIS de ESRI.

ArcGIS es un sistema de información geográfica que posee una interfaz gráfica sencilla y versátil, pudiendo incorporar fácilmente datos espaciales y tabulares para ser mostrados en forma de mapas, tablas y gráficos. ArcGIS incorpora también algoritmos internos que facilitan enormemente el trabajo de consulta, análisis y presentación de resultados. ArcGIS se compone de tres aplicaciones que están incluidas en ArcInfo, ArcEditor y ArcView, las cuales son ArcMap, ArcCatalog y ArcToolbox, (Puerta, 2011).

Sus componentes principales son:

- ArcMap: Es la aplicación central del programa, que se utiliza para construir un sistema de información geográfico (SIG). En esta componente se visualiza y explora el conjunto de datos cargados al programa. Consta de un conjunto de aplicaciones con las cuales se pueden crear datos, mapas, modelos y aplicaciones, así como su edición, desarrollo de nuevos mapas y obtención de parámetros y características geográficas.
- ArcToolbox: Esta componente posibilita la conversión de los datos espaciales entre formatos, y la asignación o modificación de su sistema de referencia o proyección. Las herramientas se encuentran organizadas temáticamente, y mediante el empleo de intuitivos asistentes permiten realizar dichas funciones de forma sencilla e inmediata; su poder radica en funciones para análisis espacial (Orduña, 2007).
- ArcCatalog: Permite manipular y acceder la información geográfica de un modo fácil. Desde éste se agregan conexiones, se comparten bases de datos y se construye un catálogo de información. También es posible observar diferentes vistas para ver las fuentes de información geográfica que están disponibles con su respectiva conexión y explorar los contenidos individuales de las fuentes de datos. Los datos son presentados en una estructura de árbol y se pueden pre-visualizar los archivos espaciales (Orduña, 2007).

Para realizar el respectivo análisis con ArcGIS es necesaria información suficiente, confiable y de calidad, que permita obtener una buena aproximación a la realidad. Distintas fuentes pueden proporcionar los datos necesarios. Algunas son de libre acceso, otras de pago, algunas pertenecen a administraciones públicas locales y otras de empresas privadas.

La información básica de donde parte el estudio SIG es un modelo digital del terreno, o DEM. Un DEM es una representación gráfica de una superficie continua, usualmente referida como una superficie de la tierra. Se trata de un archivo que indica para cada punto del mapa cuál es

su altura topográfica, por lo que constituye un modelo de relieve de la cuenca. Estos archivos suelen ser de tipo *Raster*: una matriz de puntos donde cada uno contiene información específica. Para datos topográficos, el valor del punto corresponde a su altura geométrica.

Dado que el flujo de las aguas a través de la superficie es siempre en dirección de máxima pendiente, una vez que la dirección de flujo es conocida es posible determinar cuáles y cuántas celdas fluyen hacia una celda particular. Esta información puede ser utilizada para definir los límites de las cuencas y la red de drenaje. A partir de un procesamiento de estos datos puede obtenerse la delimitación de cada subcuenca del modelo, los cauces principales, su longitud y pendiente, así como otros parámetros físicos que ayudarán a la realización del modelo hidrológico.

La aparición del módulo de interfaz geoespacial HEC-GeoHMS (Geospatial Hydrologic Modelling System Extension), desarrollado por el centro de Ingeniería Hidrológica del Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los EEUU (Doan 2003) como una extensión del SIG ArcGIS, permite generar la información que caracteriza a la cuenca y los parámetros hidrológicos de entrada para el modelo HEC-HMS de forma compatible, rápida y cómoda.

5.2 Modelos hidrológicos

Con el fin de conocer y cuantificar la respuesta hidrológica de una cuenca es indispensable el uso de algún tipo de sistema esquemático mediante el cual se represente de forma simplificada el sistema real; en otras palabras: un modelo.

Éste tiene por objetivo la representación de los procesos que integran la porción del ciclo del agua a estudiar, así como los distintos agentes que influyen en el mismo y su interrelación. Ésta representación se realiza de forma simplificada y en términos matemáticos, lo que permite establecer relaciones de causa-efecto en el sistema real, evaluar su respuesta y anticipar ciertos eventos, pudiendo finalmente tomar decisiones en materia de hidrología, gestión de recursos y riesgo hídrico (Dueñas, 1997).

La diferencia con respecto a un modelo hidráulico radica en las dimensiones del área de estudio, así como los procesos que en éstos se representan: mientras que un modelo hidrológico pretende dar respuesta al conjunto de procesos que sucede a nivel de cuenca, desde la entrada del agua a ésta por cualquiera de las vías posibles (precipitación, aportación superficial/subterránea...), un modelo hidráulico simula un dominio mucho más reducido, el cauce y su llanura de inundación, y con un nivel de detalle mucho mayor, teniendo en cuenta menos procesos pero de una manera mucho más precisa (e.g. reparto del caudal circulante en una sección de cauce).

En el caso que concierne al presente proyecto, los procesos que afectan a un embalse tienen una región de influencia extensa y los procesos son muy variados; el estudio debe realizarse a

nivel de cuenca, y es por ello que se ha contemplado el uso de modelos hidrológicos para simular y caracterizar los fenómenos que conducen a variaciones del volumen almacenado.

Existe una multiplicidad de tipologías de modelo, según las hipótesis de partida y su funcionamiento interno. En los siguientes puntos se pretende mostrar las distintas clasificaciones posibles de un modelo hidrológico en base a 4 criterios (Bladé et al., 2014):

- Según el carácter de los datos:
 - Determinístico: la respuesta se estima en base a operaciones matemáticas representativas de los procesos físicos. En el procedimiento, los valores de variables y parámetros son datos fijados, por lo que ofrecen como resultado un valor numérico único.
 - Probabilístico: Se diferencian en estadísticos, cuando requieren el uso de largas series de datos, tratando con ejemplos ya observados; o bien estocásticos, cuando al menos un dato o variable del modelo es considerada como aleatoria, resultando en una función de distribución de probabilidad como resultado.
- Según la representación espacial:
 - Modelo agregado o concentrado: considera una distribución espacial uniforme de las variables, es decir, los parámetros son considerados homogéneos espacialmente. Para ello, es frecuente utilizar valores reales promediados en el espacio. De este modo, el conjunto modelado puede simularse como una única unidad, realizando un solo balance hídrico y sin caracterizar explícitamente la variabilidad espacial de la respuesta (Chow, Maidment et al., 1994).
 - Modelo semi-distribuido: permite una cierta variabilidad espacial mediante la discretización del dominio de estudio en distintos sub-modelos agregados (subcuencas).
 - Modelo distribuido: representa explícitamente la variabilidad espacial de las características superficiales de la cuenca y de las precipitaciones mediante la división en mallas de celdas, por lo que requieren información detallada de la zona de estudio. Se utilizan técnicas numéricas como el método de las diferencias finitas o de elementos finitos para realizar el cálculo en cada celda de la malla que representa la cuenca.
- Según la representación de los procesos
 - Modelo métrico o empírico: los procesos reales son caracterizados sin apenas considerar los procesos físicos que ocurren. Requieren una cantidad reducida de datos para ejecutar el modelo, pero grandes esfuerzos de recolección, calibración y validación para la definición de éste. Su aplicabilidad es limitada y no admiten cambios en los condicionantes de la cuenca. (Aguilar, 2006)
 - Modelo conceptual: simula los procesos físicos más importantes asimilándolos a simplificaciones conceptuales dependientes de ciertos parámetros que pueden no tener un sentido físico real, por lo que requieren de calibraciones (Klemes V., 1989)

(Saravia A., 2002). Dado que la calibración puede no ser única, también requiere de esfuerzos de validación.

- Modelo de base física: se fundamenta en el conocimiento preciso y la cuantificación de los procesos hidrológicos y las ecuaciones diferenciales que los rigen, por lo que los parámetros tienen verdadero sentido físico y pueden ser determinados a priori, pero requiriendo un gran número de datos y esfuerzo computacional.
- Según la extensión temporal
 - Modelo de episodio o a corto plazo: simula eventos de corta duración, horas o pocos días, por lo que no consideran procesos lentos como la variación de humedad entre eventos o flujo subterráneo.
 - Modelo continuo o de largo plazo: el intervalo y el horizonte de simulación es mayor, considerando entonces los cambios producidos entre eventos tales como la humedad del suelo, la recarga del acuífero, así como las distintas aportaciones y evolución temporal de extracciones.

Es importante reseñar que no existe un único modelo universalmente mejor, y que la elección del mismo, debe ser fruto de los objetivos del estudio, del conocimiento de la física del fenómeno en cada cuenca a modelar, su comportamiento, así como de la capacidad para estimar correctamente los parámetros del modelo elegido. La información requerida nunca se tendrá en su totalidad, por lo que siempre es necesaria una calibración previa y validación posterior. Dadas las limitaciones de cualquier modelo, tanto por las hipótesis internas de cálculo, como por las incertidumbres asociadas a la determinación de sus parámetros, los modelos numéricos deberían satisfacer los siguientes principios:

- Parsimonia. El número de parámetros debe ser minimizado cuanto mayor sea el grado de incertidumbre en los mismos.
- Modestia. El objetivo y la aplicabilidad del modelo no deben ser sobre-valorados.
- Precisión. No puede pretenderse que la precisión del resultado de la simulación sea mayor a la precisión de los datos de entrada.
- Validez. La bondad de los resultados de un modelo debe ser verificable con mediciones reales, de modo que pueda definirse su validez y límites de aplicabilidad.

Con la presentación del modelo agregado conceptual SWM-IV de Crawford y Linsley (1966), ha aparecido una multiplicidad de modelos distintos que pueden clasificarse según cualquiera de los criterios arriba mencionados.

Históricamente la tendencia conducía al uso predominante de modelos concentrados sobre modelos distribuidos, encontrando su principal motivo en las limitaciones computacionales y la falta de disponibilidad de datos hidro-meteorológicos de calidad y en cantidad. Estos modelos concentrados sólo ofrecían resultados de la respuesta de la cuenca en el punto de salida de la

misma, sin considerar las respuestas parciales de los elementos interiores de manera individualizada. Ejemplo de ello es el método del hidrograma unitario (Ponce, 1989).

Sin embargo, los avances tecnológicos y computacionales de la última década han permitido superar la frontera prohibitiva del coste de cálculo de modelos distribuidos, así como facilitado la disponibilidad de datos SIG que permiten la descripción de la cuenca topográfica, uso y tipo de suelo, lluvia, etc. De este modo, se tiende últimamente al uso de modelos hidrológicos distribuidos con el objeto de aprovechar su capacidad de representación espacial de los parámetros y datos de entrada (Vieux, 2004). Éstos ofrecen nuevas ventajas en la estimación de sus parámetros, ya que tienen una interpretación física cuyo valor puede ser determinado en campañas o en laboratorio (Rafaelli, 2003).

Por otro lado, en muchos casos se opta aun así por el uso de modelos de parámetros agregados debido a su simplicidad en cuanto a caracterización y calibración de los parámetros. Es entonces cuando debe prestarse especial atención a las hipótesis tomadas, comprobando que sean asumibles y no comprometan la verosimilitud del modelo. Por ello es conveniente realizar validaciones numéricas, empíricas y análisis de sensibilidad que nos permitan conocer los límites de aplicabilidad del modelo.

Una solución intermedia consiste en el desarrollo de un modelo semi-distribuido, que consiste en la división de una cuenca en un número determinado de subcuencas distintas, independientes e interconectadas entre sí, pero consideradas uniformes en sí mismas. De este modo, mediante el acople de modelos agregados podemos obtener un modelo que conserve la variabilidad espacial deseada en función de las propiedades del contexto a modelar. Sin embargo, pueden notarse algunos inconvenientes (Vieux 2004):

- La caracterización singular de cada una de las cuencas puede resultar compleja, debido a la falta de datos suficientes para calibrar la abstracción que conlleva un modelo agregado (e.g. caudales a la salida de cada subcuenca para un evento de lluvia).
- La representación del modelo y sus resultados pueden verse afectados por el proceso de modelado, en función del criterio de separación del dominio en subcuencas y sus propiedades.
- Es probable que a escala de subcuenca la variabilidad de los parámetros no se modele correctamente, debido a que las hipótesis de uniformidad espacial pueden ser de dudosa aplicación.
- El modelo resultante no tiene una base física, sino que se compone de modelos conceptuales o métricos cuyos parámetros pueden no corresponderse con magnitudes reales, sino que han sido determinados en base a calibraciones empíricas.

La distribución espacial de la precipitación y de los parámetros de infiltración afectará también en gran medida la formación de la descarga de caudal, su distribución y velocidad (Chow et al.

1988). Existen muchos estudios comparativos entre modelos distribuidos y concentrados que arrojan conclusiones sobre la necesidad de representar espacial y temporalmente la lluvia para cualquier tamaño de cuenca, lo que requiere el uso de modelos distribuidos (Orduña M. L., 2007). Por ejemplo, una tormenta que se propaga espacialmente en dirección aguas abajo de la cuenca producirá un hidrograma de un caudal pico mayor y una curva de ascenso más aguda que si ésta se considerara uniforme en el espacio y tiempo o se desplazara hacia aguas arriba. Otro caso paradigmático son los ambientes mediterráneos, donde las lluvias convectivas locales pueden repartirse sobre áreas no mayores a 10km² (Francés García & Benito Casado, 1995).

Es importante resaltar que hay casos muy particulares en los que la utilización de modelos distribuidos y modelos concentrados dan resultados muy parecidos. Es importante identificar si existe una alta sensibilidad del modelo frente a la variabilidad espacial de la lluvia, en cuyo caso un modelo distribuido nos ofrecerá mejores resultados respecto a un modelo agregado (siempre que la disponibilidad de datos sea suficiente). De lo contrario, un modelo agregado o semi-distribuido siempre será más manejable, versátil, fácilmente ajustable y con un coste computacional de órdenes de magnitud inferior.

Uno de los parámetros a fijar son las dimensiones del espacio de modelado. En este sentido, ya es extendido el uso de las cuencas como elemento de gestión de recursos, ya que ésta:

- Es una unidad hidrológica natural para la gestión y planificación del recurso hídrico en cuestión.
- Provee de una visión completa de todos los elementos que la componen.
- Ésta puede ser descompuesta en otras unidades menores o añadida en unidades mayores con facilidad.

La elección del tamaño de la cuenca deberá ser tomada cuidadosamente de manera que contemple todas las entradas de agua que realmente componen el recurso en cuestión y permita un modelado con un coste computacional rentable.

Este elemento de medida, además, crea consenso entre gestores, ingenieros, científicos y destinatarios del recurso. La visión globalizada que aporta da pie a la aplicación de modelos de IWRM.

Aun así, su uso puede comportar también algunas desventajas. Las cuencas naturales no reflejan por ejemplo las fronteras políticas, lo que puede implicar la necesidad de coordinar un gran número de agentes de diferentes países. Esto puede resultar en conflictos y rivalidades, y una alta dificultad para asegurar fondos para la coordinación y planificación de las actividades. Dado que las cuencas se definen por su dimensión topográfica y no económica ni social, en cuencas transcomunitarias y transnacionales es frecuente la creación de un Organismo de Cuenca que vele por la gestión integral de ésta y los intereses de todas las regiones o países implicados.

5.3 Datos de entrada

Como ya se ha comentado, cada modelo tendrá sus necesidades particulares. Éstas, juntamente con las características del sistema, serán las que fijen los datos de entrada necesarios, aunque no siempre coincidirán con los disponibles. En estos casos los datos de entrada existentes limitarán las posibilidades reales del modelo, obligarán a tomar hipótesis sin un conocimiento real de los datos, o bien harán necesaria una larga y costosa campaña de recogida de datos.

Por otra parte, pese a disponer de una gran cantidad de datos de entrada, existe un necesario trabajo previo de selección y sintetización de éstos, escogiendo qué datos son los realmente necesarios y en qué medida/cantidad. Existen multitud de estudios al respecto en función de a qué se quiere dar respuesta (gestión de un embalse, riesgo de inundación, creación de escenarios progresivos durante años...) y con qué margen de tiempo (previsión de alerta temprana, gestión a medio-largo plazo...).

Dado el presumible alto coste de los datos y su tratamiento, es necesaria una racionalización de los recursos para contar con los datos esencialmente útiles en la cantidad, distribución y temporalidad necesarias. Estos factores son difíciles de determinar, y frecuentemente no es posible realizar este trabajo por la escasez de información, o se realiza por prueba y error. En función de los datos de entrada, su distribución temporal y espacial, hablaremos de los ya vistos modelos determinísticos, probabilísticos, agregados, semi-distribuidos, distribuidos, etc.

Es altamente aconsejable el estudio detallado de cuáles son las funciones de la información hidrológica de nuestro sistema sobre sus resultados, sabiendo que existirá un alto grado de particularización difícilmente extrapolable. Una manera recomendable de hacerlo será mediante el estudio de las principales variables hidrológicas frente a las decisiones de gestión tomadas históricamente. Esto se hace con el objetivo de encontrar, si las hay, las principales relaciones entre variables que pueden afectar la función objetivo para la toma de decisiones. Este procedimiento se ha aplicado ya a diferentes embalses, llegando a conclusiones importantes a tener en cuenta. La primera de ellas es la afirmación de que no existe una variable de dominio predominante sobre el resto que sea común en todos los embalses. Sus factores hidrológicos clave son distintos en función a, principalmente (Hejazi et Al., 2008):

- El uso del sistema;
- La estacionalidad;
- El tamaño del sistema;
- La incertidumbre en las previsiones.

Se puede, sin embargo, extraer ideas generales considerando que no siempre serán válidas. Por ejemplo, cuencas pequeñas de irrigación o el estudio de inundaciones requerirán datos con renovación corta, inferior a lecturas diarias (Xie et Al., 2005).

Pese a la enorme variedad de posibilidades, se puede coincidir en que, al menos, la modelación fidedigna de una cuenca debe contar con una serie de datos característicos de su naturaleza y funcionamiento. Tal y como se ha presentado, los datos que podemos necesitar se pueden resumir en aportaciones de agua, demandas, y sus distribuciones espaciales y temporales. Éstos engloban a su vez una alta variedad de factores que los determinan, como por ejemplo:

Tabla 2: Variables necesarias para la calibración, validación y explotación de un modelo hidrológico.

Aportación de agua	Demandas	Información espacial y temporal
Caudal de entrada y salida del embalse	Volumen requerido para abastecimiento	Topografía (modelo digital de elevaciones)
Caudal de los ríos del sistema	Caudales ecológicos y requerimientos ambientales	Geolocalización de elementos (ríos, embalses, tomas de captación, poblaciones...)
Flujos subterráneos de procedencia de los acuíferos	Consumos para generación de energía	Información distribuida de precipitaciones (pluviómetros)
Registros históricos de lluvias y temperaturas.	Previsiones de consumos de agua de abastecimiento	Información distribuida de acuíferos (pozos)
Predicciones de precipitaciones	Previsiones de consumos energéticos	Frecuencia de muestreo de los datos
...

El valor económico de la obtención de dichos datos puede, o no, ser elevado. En la actualidad, muchos países desarrollados facilitan los mismos, incluso de forma gratuita mediante plataformas de acceso público con carácter frecuentemente académico. No se puede decir lo mismo en países en vías de desarrollo, que no suelen contar con la instrumentación de campo suficiente, y representan un mayor reto para la modelación. A esto puede sumarse la escasez de agua y la inexistencia de medios infraestructurales, lo que puede hacer doblemente provechosa una gestión eficiente y, por consecuente, el uso de modelos.

Para los datos difíciles o costosos económicamente de hallar y que no se encuentren disponibles, se deberá estudiar su obtención de forma anticipada a la aplicación del modelo, en una fase previa de recolección de datos y caracterización de la zona. Esto puede requerir de campañas de campo de expertos en la materia o de la contratación de empresas especializadas.

5.3.1 La previsión meteorológica

Una correcta planificación de cualquier sistema hídrico necesita del conocimiento de los datos de salida y entrada del sistema, además de una previsión de los mismos. Principalmente se distinguen entre predicciones de entradas de agua (filtraciones, precipitaciones...) y predicciones de salidas de agua (demanda de energía, demanda de agua para el consumo...).

Si únicamente se dispone de datos para el momento presente, es imposible disponer de una ventana de pronóstico que permita solventar escenarios adversos anticipadamente. Aun así, toda predicción siempre tiene asociado un nivel de incertidumbre.

Estas previsiones pueden ser a corto o largo plazo: a mayor tiempo de previsión, mayor incertidumbre. La previsión a corto plazo puede, y debe, ser calibrada con datos a tiempo real (con ventanas de lectura cortas, de minutos u horas) para reducir así la incertidumbre asociada. Esto además proporciona lecturas en directo del estado del sistema y genera mayor confianza para los operadores. Los equipos de lectura para este tipo de datos no representan un coste alto y aseguran un mejor uso y una mejora continua de las predicciones (Labadie, 2004).

Las previsiones se generan a través del estudio de series históricas existentes y sus indicadores asociados, mediante la creación de modelos climáticos. Multitud de estudios centran sus esfuerzos en analizar dichos modelos climáticos y sus implicaciones en los modelos de simulación hídricos. Los resultados son muy variados, coincidiendo en que actualmente las incertidumbres siguen siendo muy altas. Se debe ser conocedor de dichas incertidumbres para un uso responsable, que debería ir asociado a escalas de riesgo, generación de escenarios mediante modelos de optimización con programación dinámica y el uso de datos estocásticos (Celeste et Al., 2009) (Shao et Al., 2011).

Aun así, existen también voces muy críticas con la predicción a corto plazo: *Pese a que los modelos climáticos están mejorando día a día, aún no están preparados para el “prime time”, o como mínimo no para su aplicación en los problemas de gestión hídrica. Se necesita más investigación, y las predicciones deben mejorar considerablemente antes de poder tener un uso efectivo para la planificación y diseño. (...) No se pronostican mejoras suficientes hasta dentro de una década o dos* (Zbigniew et Al., 2009). Se recomienda el estudio exhaustivo de las implicaciones del uso de previsiones antes de aplicarse a modelos de ayuda a la toma de decisiones.

En Abril de 2004, en el Seminario sobre Sistemas de Información y Pronóstico Hidro-meteorológicos organizado en Valencia por el Instituto Nacional de Meteorología de España, la Confederación Hidrográfica del Júcar y la Organización Meteorológica Mundial (OMM), se generó un documento denominado Declaración de Valencia en el cual se recoge la necesidad de acoplar los modelos meteorológicos a modelos hidrológicos con el principal objetivo de mejorar las posibilidades de predicción y alerta de las crecidas. En dicha Declaración quedó reseñado

que una cooperación estrecha entre meteorólogos e hidrólogos y sus respectivas organizaciones es, además de absolutamente necesaria para la elaboración de una predicción de crecidas confiable y oportuna, beneficiosa para ambas comunidades: si la hidrológica aprovecha los datos y predicciones meteorológicas para definir mejor los parámetros de entrada a sus modelos, en particular el campo de precipitaciones, tanto la comunidad meteorológica como la hidrológica obtienen ventajas y realzan el valor socio-económico de su labor.

Las posibilidades de previsión meteorológica a medio-largo plazo se desarrollarán en el apartado 10: *Modelo Predictivo*.

5.4 Calibración y validación del modelo

Una vez realizado el modelo debemos cerciorarnos de que éste se adapta correctamente al funcionamiento del sistema, imitando fidedignamente los procesos modelados. Esta comprobación se realizará mediante la calibración y validación del mismo. Ambas operaciones son propias de un lugar determinado, lo que hace imposible realizar una validación o calibración generalizada.

Existe siempre, como se ha comentado, cierta incertidumbre en la información de partida, y consecuentemente también en los resultados obtenidos. Los cuatro problemas que se presentan para analizar la incertidumbre son los siguientes (Singh, 1995):

- Incertidumbre asociada a la estructura final del modelo, los procesos escogidos para ser modelados, su interacción múltiple y su caracterización matemática;
- Incertidumbre por falta de información espacial o temporal de los datos de entrada;
- Incertidumbre en los parámetros del modelo: problemas en la identificación y calibración de los parámetros;
- Incertidumbre intrínseca de las prognosis futuras.

La reducción de cada fuente de incertidumbre implica unos costes y esfuerzos muy distintos. En base a los puntos anteriores:

- La incertidumbre por la propia estructura puede reducirse si se evalúan distintos procedimientos de cálculo análogos paralelamente, realizando modelos más simples y más complejos del mismo sistema físico y observando las diferencias que se producen en los resultados. Este proceso, si bien no es costoso económicamente de manera directa, requiere de personal, experiencia y tiempo para su desarrollo.
- La falta de información espacial y temporal puede paliarse invirtiendo en la mejora de la toma de datos acorde a las necesidades mediante nuevos sistemas de medición. El coste económico resulta evidente, pero el mayor inconveniente es la necesidad de mucho tiempo -años- para conseguir una buena base de datos sobre la que trabajar.

- Los parámetros del modelo que no tienen sentido explícitamente físico deberán ser calibrados y constantemente actualizados. La calibración de parámetros será en muchos casos la forma más económica de reducir en parte la incertidumbre del modelo.
- La incertidumbre de las previsiones de aportación y extracción es sin duda la más limitante de todas. Como se ha comentado, el estado del arte actual en previsiones no está a la altura todavía para obtener la calidad de resultados que la modelación hidrológica desearía (Zbigniew et Al., 2009).

Becker & Pfuetzner (1991) destacan que, para pequeñas escalas, se necesitan modelos complejos con un alto grado de detalle, mientras que para áreas más grandes puede ser suficiente estructuras de modelación menos complicadas (la paradoja hidrológica). Grayson et al. (1992), refiriéndose a la tendencia a elegir modelos complejos, señala que para casi todas las aplicaciones, independientemente de la complejidad del modelo, la descripción de los procesos será demasiado grosera para obtener predicciones muy afinados. De tal manera que Hillel (1986) menciona como principio rector de la futura modelación hidrológica la minimización del número de los parámetros de entrada requeridos. Añadir componentes o ampliar las descripciones matemáticas incrementarán los datos de entrada y el manejo del modelo, lo que puede llevar a restringir su uso. Aumentar el número de datos de entrada debería ser siempre proporcional a la mejora resultante en la actuación del modelo.

5.4.1 Calibración

Por calibración se entiende la mejora de las estimaciones de los parámetros iniciales por medio de la comparación de los valores simulados con los medidos (Beven & O'Connell, 1982). Una consecuencia lógica de la naturaleza física del modelo es que se pueda calibrar un amplio número de parámetros. Es por ello que resulta interesante realizar un análisis de sensibilidad previo a la calibración para determinar los parámetros verdaderamente influyentes sobre los resultados del modelo, de modo que no se inviertan recursos innecesarios en la determinación de parámetros superfluos.

Anderson & Rogers (1987) resaltan que diferentes combinaciones de parámetros podrían dar resultados casi idénticos en el modelo. Claramente, los procesos incorporados en el modelo no son todos los que ocurren en la realidad (como el karst) y la incorporación de los procesos no es siempre la más realista desde el punto de vista físico.

El proceso de calibración del modelo consta de dos partes: especificación de los parámetros y la estimación de los parámetros.

- La especificación consiste en determinar qué parámetros van a finalmente intervenir en el modelo, y qué valores pueden adoptar (umbrales máximo y mínimo, por ejemplo).

- La estimación consiste en determinar, para cada parámetro, el valor que hace ajustar mejor los resultados del modelo con la respuesta real observada.

La obtención del valor final se realiza mediante procesos de optimización iterativa, los cuales pueden ser manuales o utilizando herramientas computacionales, dependiendo de la complejidad en el análisis de la información. Por medio de herramientas computacionales es más fácil encontrar una única respuesta óptima, si existiera. Los primeros en intentar una calibración empleando herramientas computacionales fueron Dawdy y O'Donnell (1965), Nash y Sutcliffe (1970), e Ibbitt (1970), entre otros.

Tanto en el método manual como computacional, se define siempre una función objetivo que sintetice numéricamente cuál es el grado de similitud entre una simulación y su correspondiente valor real. De este modo se podrá comparar de forma objetiva una configuración de parámetros con otra para escoger la mejor.

Es importante destacar que la calibración es condición necesaria, pero no suficiente, para estimar como correcta la operatividad del modelo (Klemes, 1989). Siempre deberá contemplarse con la validación.

5.4.2 Validación

Se trata de la complementación del proceso de calibración para demostrar que el modelo es capaz de hacer predicciones para periodos fuera del rango de calibración (Refsgaard & Knudsen, 1996). La validación durante periodos cuyas características difieran altamente del periodo de calibración puede generar altas incertidumbres. Existen diferentes métodos para la minimización de dichas incertidumbres que deben ser estudiados en función de las características del modelo (Cabrera, J., 2012).

El proceso de validación conduce a la aceptación del modelo como un simulador fiable del sistema físico. Esto no significa que sus resultados deban aceptarse como estrictamente verdaderos, sino que su estructura está limpia de errores obvios y lógicos (Oreskes et al. 1994) sugiriendo un buen grado de coherencia entre el sistema físico y el modelo. Sin embargo, la cuestión es de qué manera se demuestra que el modelo refleja con fiabilidad el comportamiento de la cuenca. El método más común es la comparación entre la respuesta medida (obtenida con observaciones *in situ*) y los resultados ofrecidos por el modelo. Éstos mismos resultados conllevan la suposición de que están siendo verificados (Davis et al, 1991).

Tanto para la calibración como para la validación hidrológica, existen distintos indicadores de la bondad del ajuste. Moriasi et al. (2007) proponen los siguientes criterios para evaluar la calibración en función de los estadísticos RSR y NSE, recomendados en hidrología, a nivel mensual:

Tabla 3: Valores referenciales para estadísticos mensuales recomendados en hidrología (Moriasi, 2007).

Bondad del ajuste	RSR	NSE
Muy bueno	$0.00 \leq RSR \leq 0.50$	$0.75 \leq NSE \leq 1.00$
Bueno	$0.50 \leq RSR \leq 0.60$	$0.65 \leq NSE \leq 0.75$
Satisfactorio	$0.60 \leq RSR \leq 0.70$	$0.50 \leq NSE \leq 0.65$
Insatisfactorio	$RSR > 0.70$	$NSE \leq 0.50$

Dónde:

- NSE es el índice de eficiencia de Nash-Sutcliffe-NSE (1970), estadístico normalizado que determina la magnitud relativa de la varianza residual ("ruido") en comparación con la variación de los datos de medición ("información"):

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_i^{obs} - Q_i^{sim})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_i^{obs} - \overline{Q^{obs}})^2}$$

- RSR es la razón entre el RMSE y la desviación estándar de las observaciones, luego es una versión estandarizada del RMSE:

$$RSR = \frac{RMSE}{\sigma_{obs}} = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Q_i^{obs} - Q_i^{sim})^2}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Q_i^{obs} - \overline{Q^{obs}})^2}}$$

Un criterio menos restrictivo se propuso posteriormente por Molnar (2011) para el coeficiente de Nash-Sutcliffe, resumido en la siguiente tabla:

Tabla 4: Valores referenciales para el NSE (Molnar, 2011).

Bondad del ajuste	NSE
Excelente	$0.80 \leq NSE$
Muy bueno	$0.60 \leq NSE < 0.80$
Bueno	$0.40 \leq NSE < 0.60$
Satisfactorio	$0.20 \leq NSE < 0.40$
Insatisfactorio	$NSE < 0.20$

En todo caso, estos parámetros son adecuados para evaluar el ajuste de uno o varios hidrogramas, cuando el interés del presente trabajo es en realidad el volumen final, por lo que es posible que los hidrogramas no sean tan representativos de la bondad del modelo.

6. Selección del Modelo

Una vez vistos los distintos tipos de modelo, y tras una breve discusión de sus puntos fuertes y débiles, se escogerá el modelo más apropiado en base a las necesidades requeridas.

En primer lugar, en cuanto a la extensión de la cuenca, ésta es considerablemente reducida, comprendiendo una región de carácter muy local. Esto implica que la variabilidad espacial tanto de las condiciones geo-hidrográficas podría simplificarse a distintas subregiones, obteniendo un alto grado de detalle a nivel de micro-cuenca sin apenas esfuerzo.

Por otro lado, existe disponibilidad de datos de lluvia para la calibración y validación en un solo punto, por lo que carece de sentido una modelación en parámetros distribuidos si no existe información espacial de la lluvia. Por el contrario, si para previsiones futuras se emplean mapas meteorológicos satelitales o RADAR, sí que sería interesante conservar una cierta variabilidad espacial de la cuenca, lo que apunta a considerar un modelo semi-distribuido.

Debe también tenerse en cuenta que el objetivo de este trabajo es una modelación a medio-largo plazo del embalse de Siurana. En estas escalas temporales deben considerarse no sólo las aportaciones superficiales de escorrentía, sino también la escorrentía subterránea que aflorará con el paso del tiempo. Es por ello que uno de los puntos más importantes del modelo es que éste sea continuo temporalmente, esto es, que se conserven las condiciones de la cuenca tras un evento de lluvia, y se simule la evolución de éstas durante el tiempo entre eventos de lluvia (flujo subterráneo, evapotranspiración del agua del subsuelo...)

Por ello mismo, dado que nuestro mayor interés se focaliza a medio plazo y no en eventos localizados temporalmente, esto conlleva a concebir un modelo hidrológico lo más simple posible, donde la gran escala temporal omitirá el ruido asociado a variaciones de corta duración. El número de procesos deberá ser lo más limitado posible, y su descripción será también simple de manera que se facilite el manejo del modelo y la interpretación de los resultados.

Por último, dado que con todo ello se pretende ofrecer una herramienta de soporte a la toma de decisiones, y puesto que las previsiones de lluvia, comportamiento hídrico y demandas a medio plazo suelen contener incertidumbres en sí mismas, se plantea el uso de datos no determinísticos que ofrezcan una mejor idea de la sensibilidad del embalse a las incertidumbres futuras y permita una gestión hídrica con mayor conocimiento de causa.

Con todo ello, y en consonancia con la clasificación de modelos descrita anteriormente, se propone el uso de un modelo:

- Estocástico en los datos de previsión futura sujetos a incertidumbre;
- Semi-distribuido en cuanto a la resolución espacial de la cuenca;
- Conceptual en cuanto a la representación de los procesos;
- Continuo en su extensión temporal;
- Se tendrá además como requisito esencial en el presente proyecto la gratuidad del modelo a emplear.

De la oferta actual de modelos de cálculo hidrológico, se presenta a continuación una selección de los más comunes, comentando sus características principales con el fin de escoger el más adecuado.

Tabla 5: Modelos hidrológicos actuales candidatos a participar en el proyecto.

<i>Modelo</i>	<i>Carácter de los datos</i>	<i>Descripción espacial</i>	<i>Descripción temporal</i>	<i>Descripción de procesos</i>	<i>Adaptabilidad al objetivo</i>	<i>Coste computacional</i>	<i>Coste económico</i>
HEC-HMS	Determinista, con posibilidad de realizar simulaciones de Monte Carlo sobre distintos parámetros, y artificialmente.	Parámetros semi-distribuidos. El módulo ModClark permite un modelo distribuido.	Admite modelado en continuo (módulo SMA).	Principalmente conceptual	Posibilidad de simular embalses SIG-friendly con HEC-GeoHMS.	Bajo	Gratuito
MIKE-SHE	Determinista. Difícil aplicación de Monte Carlo.	Parámetros distribuidos.	Admite modelado en continuo	Físicamente basado	Posibilidad de simular embalses mediante modelo en cascada.	Medio, permisible en cualquier ordenador.	≈10.000 – 20.000 €
MIKE-11 Reservoir	Determinista. Difícil aplicación de Monte Carlo.	Parámetros distribuidos.	Admite modelado en continuo (módulo RR).	Principalmente conceptual	Software especializado en simulación de embalses.	Medio, permisible en cualquier ordenador.	≈10.000 – 20.000 €
TOPMODEL	Determinista, con posibilidad de realizar simulaciones de Monte Carlo artificialmente.	Parámetros distribuidos o semi-distribuidos.	Admite modelado en continuo	Conceptual/ Físicamente basado	Posibilidad de simular embalses.	Bajo	Gratuito
TETIS	Determinista, con posibilidad de realizar simulaciones de Monte Carlo artificialmente.	Parámetros distribuidos.	Admite modelado en continuo	Principalmente conceptual	Posibilidad de simular embalses	Bajo	Gratuito
LISFLOOD	Determinista, con posibilidad de realizar simulaciones de Monte Carlo artificialmente.	Parámetros distribuidos.	Admite modelado en continuo	Conceptual/ Físicamente basado	Posibilidad de simular embalses	Bajo	Gratuito
TOPKAPI	Determinista, con posibilidad de realizar simulaciones de Monte Carlo artificialmente.	Parámetros distribuidos.	Admite modelado en continuo	Físicamente basado	Posibilidad de simular embalses	Bajo	≈2.000 €
IBER	Determinista. Difícil aplicación de Monte Carlo.	Parámetros distribuidos.	Modelo de evento por el momento	Conceptual/ Físicamente basado	No contempla embalses. Debería acoplarse otro modelo a la salida	Medio, permisible en cualquier ordenador.	Gratuito
SWAT	Algunos procesos admiten ser estocásticos (lluvia)	Parámetros semi-distribuidos	Admite modelado en continuo	Principalmente conceptual	Posibilidad de simular embalses	Bajo	Gratuito

A continuación, se ha realizado un sencillo análisis multi-criterio de la siguiente forma:

1. Se ha asignado un peso distinto a cada categoría a estudiar;
2. Se ha puntuado entre 0 (desestimable) y 3 (muy apta) la realización de cada criterio para cada modelo;
3. Se han sumado ponderadamente las puntuaciones de cada modelo;
4. Se ha determinado el modelo más apto para el presente estudio.

Los pesos utilizados para cada criterio han sido:

Tabla 6: Pesos asignados a cada categoría para el análisis multi-criterio.

Criterio	Ponderación	Criterio	Ponderación
1. Carácter de los datos	2	5. Adaptabilidad al objetivo	2
2. Descripción espacial	2	6. Coste computacional	1
3. Descripción temporal	3	7. Coste económico	3
4. Descripción de procesos	1		

Y las puntuaciones por modelo han resultado:

Tabla 7: Puntuaciones por categoría para cada modelo candidato.

Criterio:	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	Total
HEC-HMS	3	3	3	3	3	3	3	42
MIKE-SHE	2	3	3	3	3	2	0	30
MIKE-11 Reservoir	1	1	3	3	3	2	0	24
TOPMODEL	2	3	3	3	3	3	3	40
TETIS	3	1	3	3	3	3	3	38
LISFLOOD	2	1	3	3	3	3	3	36
TOPKAPI	2	1	3	2	3	3	0	26
IBER	1	1	0	3	1	2	3	20
SWAT	2	3	3	3	3	3	3	40

Tras el breve análisis multi-criterio, el modelo resultante como más apto para el fin del proyecto es el modelo HEC-HMS.

6.1 HEC-HMS

El programa HEC-HMS es un modelo de simulación hidrológica desarrollado por el U.S. Army Corps of Engineers, el cual permite tener en cuenta múltiples procesos hidrológicos, pudiendo escoger para cada uno distintos métodos de cálculo en función de la disponibilidad de datos del modelador. El programa permite construir una representación esquemática semi-distribuida de

la cuenca mediante diferentes tipos de elementos, cuya descripción y funcionalidad se indican a continuación.

a) Subcuenca: No recibe ningún flujo entrante y da lugar a un único flujo saliente como consecuencia de la serie temporal de precipitaciones definidas y los procesos internos de infiltración y evaporación. De este modo se transforma el exceso de precipitación en escorrentía superficial y subterránea. Una única subcuenca dará lugar a un modelo agregado, mientras que la interconexión de múltiples subcuencas proporcionará un modelo semi-distribuido.

b) Tramo de cauce: Este elemento puede recibir uno o varios flujos entrantes y da lugar a un solo flujo saliente, haciendo la función de propagación de un hidrograma o la suma de varios. Los flujos entrantes, que provienen de otros elementos de la cuenca, tales como subcuencas u otros tramos de cauce, se suman antes de abordar el cálculo del flujo saliente.

c) Embalse: Recibe uno o varios flujos entrantes, procedentes de otros elementos, y proporciona como resultado del cálculo un único flujo saliente, que puede ser predeterminado o simulado en función del nivel y las características de aliviaderos y desagües de fondo, reproduciendo los fenómenos de laminación.

d) Confluencia: Agrega varios flujos entrantes en un único saliente, calculado como la suma directa en cada paso de tiempo, considerando nula la variación del volumen almacenado en la misma. Permite representar la confluencia propiamente dicha de ríos o arroyos, aunque ello no es imprescindible, ya que los flujos entrantes pueden proceder también de subcuencas parciales.

e) Derivación: Este tipo de elemento se caracteriza porque da lugar a dos flujos salientes, principal y derivado, procedentes de uno o más flujos entrantes. Se puede utilizar para representar la existencia de vertederos laterales que derivan el agua hacia canales, azudes o zonas de almacenamiento separadas del cauce propiamente dicho.

f) Fuente: Junto con la subcuenca, es una de las dos maneras de generar caudal en el modelo de cuenca. Se suele utilizar para representar condiciones de contorno en el extremo de aguas arriba, y el caudal considerado puede proceder del resultado del cálculo efectuado en otras cuencas.

g) Sumidero: Recibe uno o varios flujos entrantes y no da lugar a ningún flujo saliente. Este tipo de elemento puede ser utilizado para representar el punto más bajo de una cuenca endorreica o el punto de desagüe final de la cuenca en cuestión.

La combinación de estos tipos de elementos, con las adecuadas conexiones entre ellos, constituye finalmente la representación esquemática de la cuenca total.

Cabe mencionar que para el correcto desarrollo del modelo hidrológico, debe realizarse previamente una caracterización topo-hidrográfica de la zona de estudio, que proporcionará las características físicas y topográficas de la cuenca, ofreciendo muchos de los parámetros requeridos por el modelo hidrológico HEC-HMS. Para ello, típicamente se hace uso de herramientas propias de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) previamente presentadas. El modelo HEC-HMS presenta una enorme facilidad de acoplamiento con el software de SIG ArcGIS, mediante la herramienta HEC-GeoHMS.

Con estas líneas se cierra el capítulo de introducción a la modelación hidrológica, dando paso al estudio práctico del trabajo.

CAPITULO 2:

Desarrollo práctico:

Herramienta SAD para el embalse de Siurana

7. Estudio previo

En base al conocimiento e indicaciones recogidas en los apartados anteriores del trabajo, se ha realizado un estudio práctico de modelación hidrológica, cuyo foco de interés ha sido el embalse de Siurana, situado en Tarragona, con el fin de establecer un SAD en dicho embalse.

La elección de esta cuenca como objeto de estudio para el desarrollo de una modelación numérica se justifica dada la disponibilidad de datos a la que se ha tenido acceso. Como se ha querido enfatizar en los apartados previos, este factor es crítico en una modelación, pues para realizar un estudio verosímil el estado del arte menciona un mínimo de 20 años de datos pluviométricos y caudales. Para el desarrollo del estudio surgió la oportunidad de utilizar una serie de 24 años de precipitaciones, temperaturas, caudales de entrada y salida del embalse, niveles y volúmenes embalsados, con una frecuencia diaria, para el embalse de Siurana. La calidad de estos datos será discutida en este apartado del trabajo; sin embargo, han constituido una opción interesantísima para el desarrollo de una primera propuesta de SAD, por lo que finalmente se ha optado por estudiar dicho embalse. En particular, las series de datos corresponden a:

- Pluviometría diaria:
 - Estación meteorológica de Cabacés;
 - Estación meteorológica de Cornudella;
 - Estación meteorológica de Tivissa;
 - Estación meteorológica de Masroig.
- Caudales diarios:
 - Entrada al embalse de Siurana;
 - Salida del embalse de Siurana;
- Temperaturas máxima y mínima diarias:
 - Estación de Cabacés;
 - Estación de Cornudella;
 - Estación de Tivissa.
- Nivel y volumen almacenado

Para comenzar con el caso práctico, se presenta a continuación una síntesis de las principales características de la cuenca del río Siurana y del embalse de Siurana, así como su régimen de caudales, usos del suelo, meteorología y demás puntos de interés para su modelación numérica. Será siempre indispensable un estudio de campo que determine las características y condicionantes principales del sistema objeto de estudio previo a la modelación y diseño de un SAD.

7.1 La cuenca

La cuenca del río Siurana se sitúa en el sector sur de Cataluña (Figura 9). El curso fluvial nace en la sierra de Prades y después de transcurrir en dirección oeste – suroeste confluye con el río Ebro entre los núcleos de Gràcia y Móra d'Ebre. Su cuenca ocupa una superficie aproximada de unos 621,4 km², y aporta un caudal medio diario en régimen natural de unos 2,68 m³/s, lo que supone una aportación media de 84,65 hm³/año.



Figura 9: Localización y caracterización de la cuenca del río Siurana. Adaptación de ACCUA (2011).

Engloba mayoritariamente la comarca del *Priorat*, zona representativa de la Cataluña árida, de relieve accidentado por la cordillera pre-litoral catalana. En los lugares de fuerte pendiente abunda el bosque, ocupando un 76% de la superficie, siendo un 24% matorrales y arbustos. Otro 22% es dedicado a la agricultura (ACCUA, 2010). El área total es de 615 km². A continuación se comentan sus características principales.

7.1.1 El río

El Siurana es un río de zona baja mediterránea con un régimen típicamente mediterráneo, de estacionalidad muy marcada y un régimen fluvial de tipo pluvial. Los caudales mínimos de toda la cuenca se registran durante el mes de agosto y los más importantes se presentan durante el invierno (diciembre-enero) o durante la primavera. Por las mencionadas características, pertenece pues al subtipo B2, hidroregión que agrupa los ríos de régimen mediterráneo.

El río Siurana nace en las montañas de *Prades* y desagua en el Ebro. El caudal correspondiente a una avenida con periodo de retorno de 500 años es de 306 m³/s (ACA, 2002). Sin embargo, en las partes media y baja de la cuenca, el río es de carácter efímero, estando seco buena parte del año.

7.1.2 Pluviometría

La situación cercana al mar y a su vez al interior catalán, junto con el carácter abrupto del terreno, provocan eventos de lluvia de carácter fuertemente orográfico, particularmente en las

montañas de Prades. Estos fenómenos consisten en el ascenso de una masa de aire cargado de humedad al encontrarse con un obstáculo orográfico, con el consiguiente enfriamiento de la masa hasta alcanzar el punto de saturación del vapor del agua y precipitar sobre el terreno.

En el caso de Siurana, el viento de levante viene cargado de humedad procedente del mar, que al encontrarse con la Sierra pre-litoral es obligado a ascender y enfriarse. Este tipo de fenómenos origina eventos de lluvia intensa y de corta duración (varias horas, pudiéndose extender a pocos días si el fenómeno que lo origina es persistente).

A continuación se muestra la caracterización climatológica de la cuenca del Siurana (Figura 10) según la clasificación climática de Köppen-Geiger, a partir de Atlas Digital de Catalunya (Ninyerola et al., 2000) según los criterios actualizados de Kottek et al. (2006). En ella se observa la amplia predominancia de climas cálidos húmedos pero de veranos secos.

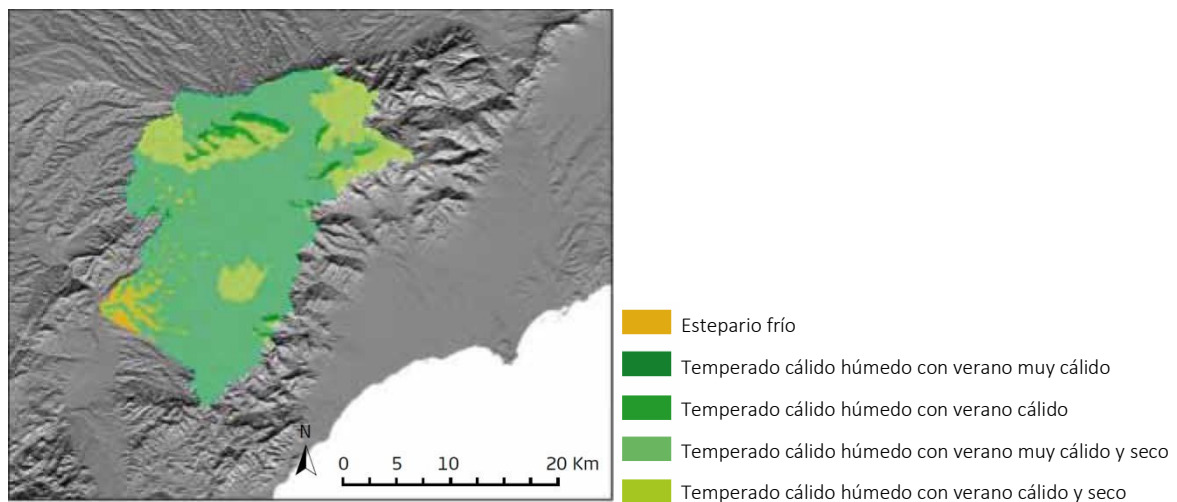


Figura 10: Caracterización climatológica de la cuenca del Siurana. Adaptación de ACCUA (2011).

En efecto, podemos verificar este comportamiento en la Figura 11, donde se presenta un diagrama de precipitación media diaria en Cabacés, el Priorat, sobre una ventana móvil de 10 días para los años 1971-2000, provenientes de la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET). Los máximos pluviométricos son equinocciales tanto en frecuencia como en cantidad, siendo en otoño el más acusado, seguido de la primavera. Invierno y verano son estaciones marcadamente secas, especialmente esta última.

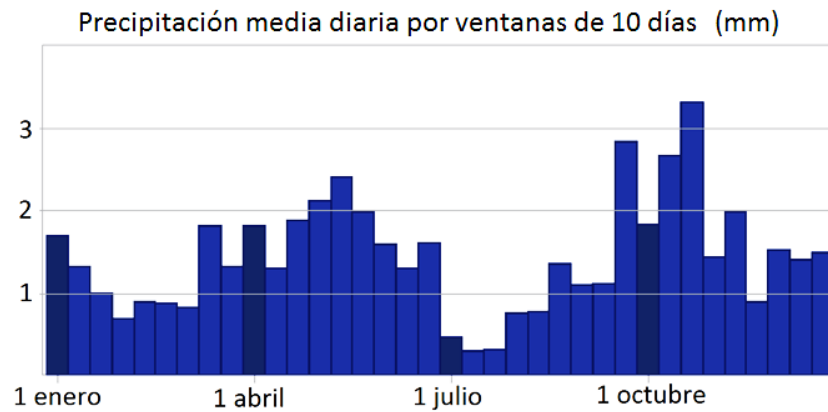


Figura 11: Precipitación media diaria en Cabacés, el Priorat. Adaptación de datos AEMET.

Esto se explica por la ubicación de la franja Este de la península Ibérica a sotavento de la influencia atlántica, lo que favorece las ciclogénesis mediterráneas de otoño sobre las aguas cálidas (Martín-Vide y Olcina Cantos, 2001).

Como se ha comentado, se dispone de una extensa serie de datos pluviométricos para 4 estaciones en la cuenca de Siurana, recogiendo la lluvia media diaria de 1984 hasta 2008 en 4 puntos distintos como se indica en la siguiente figura:

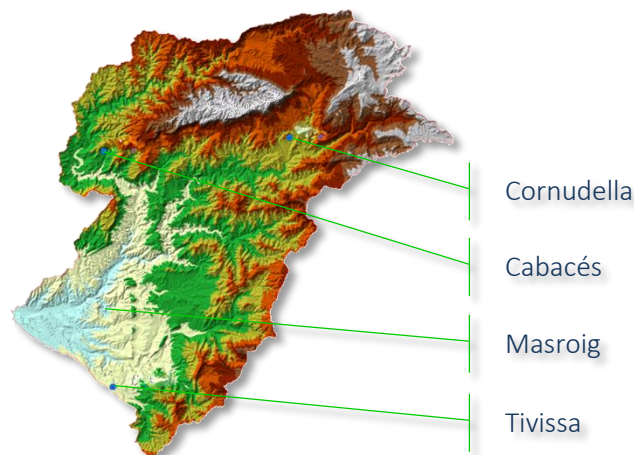


Figura 12: Emplazamiento de los pluviómetros disponibles para el estudio.

Todas ellas se sitúan en la cuenca del río Siurana; sin embargo, solamente Cornudella queda dentro de la subcuenca hidrográfica del embalse, quedando además muy cercana a un extremo de ésta y en su parte baja, donde la pluviometría es frecuentemente subestimada con respecto a los eventos de lluvia que suceden en las montañas de Prades (polo opuesto de la subcuenca).

Si tratamos la serie de datos pluviográficos de la estación de Cornudella para los años 1984-2008, es posible obtener también la media mensual, sintetizando el ciclo anual de precipitaciones. Los valores obtenidos son:

Tabla 8: Precipitación media diaria por meses para el periodo 1984-2008

Lluvia media [mm/día]	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
	1.01	0.67	0.85	1.23	1.54	0.70	0.28	0.67	1.55	2.34	1.32	1.29

Plasmando en un gráfico los datos anteriores, obtenemos el pluviograma medio anual en términos de lluvia media mensual:

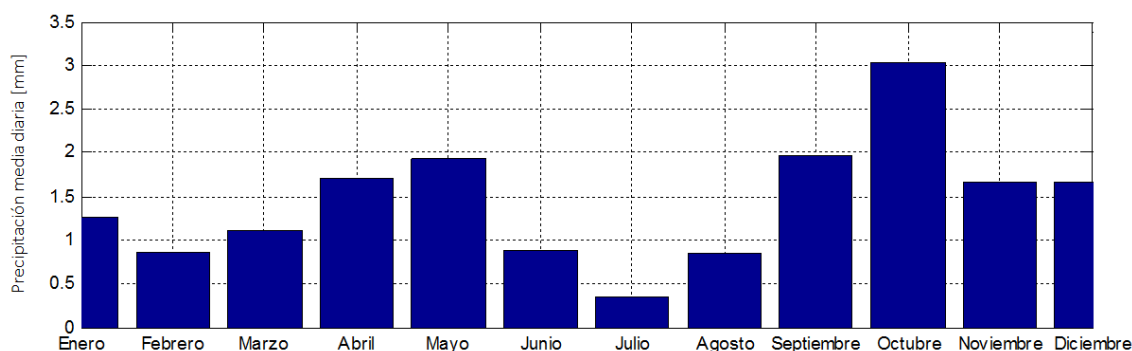


Figura 13: Precipitación media diaria por meses durante los años 1984-2008 en la estación de Cornudella.

Las tendencias observadas en los datos de ACCUA (Figura 11) recogidos en Cabacés, y los datos obtenidos por elaboración propia en Cornudella (Figura 13), son muy similares. Se remarcan dos picos pronunciados en las estaciones lluviosas de primavera y otoño, pudiendo superar los 2mm/día, y un periodo de sequía en verano, con valor en torno a 0.5mm/día. Los valores resultan en general similares, lo que arroja confianza en los datos de partida.

Debe tenerse en cuenta, sin embargo, que la irregularidad de precipitaciones tanto espacial como temporal es muy marcada, por lo que los datos promediados mensualmente carecen de sentido si se desea realizar una modelación numérica, de modo que se han tomado los datos diarios.

En cuanto a la irregularidad hiperanual, se observan también grandes diferencias, siendo la lluvia de los años húmedos del orden de tres veces superior a los años más secos. En la Figura 14 se muestra la evolución de la precipitación media anual entre los años 1912 y 2000 para la población de Tivissa, al sur de la cuenca del río Siurana. Los datos proceden de la base de datos *North Eastern Spain Adjusted Precipitation dataset* (NESAP) del grupo de investigación del Cambio Climático de la URV.

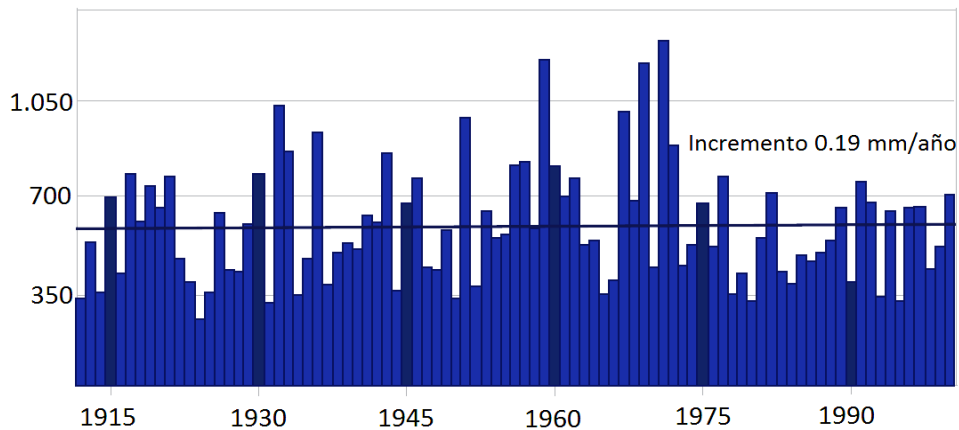


Figura 14: Precipitación media anual (mm) en Tivissa. Adaptación de ACCUA (2011).

La precipitación media anual es de entorno a 500mm (Olivares, G. et Al., 2000). Sin embargo, como se ve en la Figura 14 el valor carece también de sentido si se desea modelar numéricamente el comportamiento de forma verosímil. La irregularidad hiperanual es el principal motivo por el que los expertos en modelación hidrológica recomiendan no menos de 20 años de datos, para poder captar esta irregularidad y tenerla en cuenta en el estudio.

Comparando los datos de ACCUA en Tivissa (Figura 14), con los datos que se tienen de la estación de Cornudella en los años 1984-2008 (Figura 15), obtenemos una tendencia similar. Sin embargo, los picos más elevados sucedidos sobre las décadas de los 60-70 no se perciben en la serie de 1984-2008, pese a considerarse una serie suficientemente extensa:

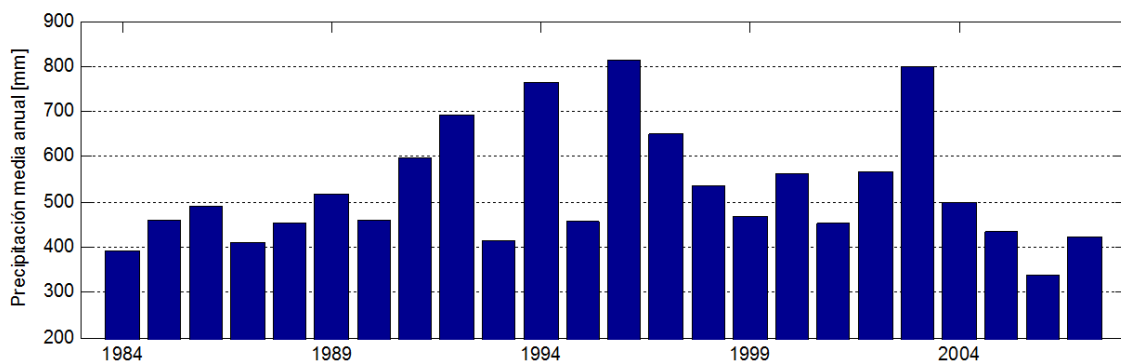


Figura 15: Precipitación media anual en Cornudella.

Debe mencionarse también que, previo a cualquier operación con los datos de lluvia, éstos han sido debidamente examinados para comprobar que en ellos no existen irregularidades, incoherencias o series incompletas de datos.

Se observaron periodos del registro de Cornudella donde no existían datos debido a un posible fallo del sistema o mantenimiento de la estación. En esos casos, y con el fin de completar la serie de Cornudella, se aplicó un algoritmo de extrapolación sobre los datos de las bases meteorológicas de Cabacés, Tivissa y Masroig. El procedimiento consiste en una ponderación mediante un criterio de peso inversamente proporcional al cuadrado de la distancia de dichos

pluviómetros. Se verificó también que los datos artificialmente generados conservaban las características estacionales propias del pluviómetro de Cornudella para el resto de años de registro.

Los pesos asignados en función de las distancias entre pluviómetros han sido:

Tabla 9: Distancias y factores de ponderación de las estaciones para la reconstrucción de la serie.

Estación	<i>Cabacés</i>	<i>Masroig</i>	<i>Tivissa</i>
Distancia	14.432 m	18.544 m	22.354 m
Factor	$4.8012 \cdot 10^{-9}$	$2.908 \cdot 10^{-9}$	$2.0012 \cdot 10^{-9}$

De modo que:

$$p_{\text{cornudella}}(i) = \frac{F_{\text{Cabaces}} \cdot p_{\text{Cabaces}}(i) + F_{\text{Masroig}} \cdot p_{\text{Masroig}}(i) + F_{\text{Tivissa}} \cdot p_{\text{Tivissa}}(i)}{F_{\text{Cabaces}} + F_{\text{Masroig}} + F_{\text{Tivissa}}}$$

Donde $P^X(i)$ es la precipitación en la estación X para el día i , y F^X es el factor de ponderación de la estación X . A modo de ejemplo se muestran a continuación los registros de las 3 estaciones para el año 1984, y el registro resultante reconstruido para la estación de Cornudella, sobre la cual no existían datos en ese periodo:

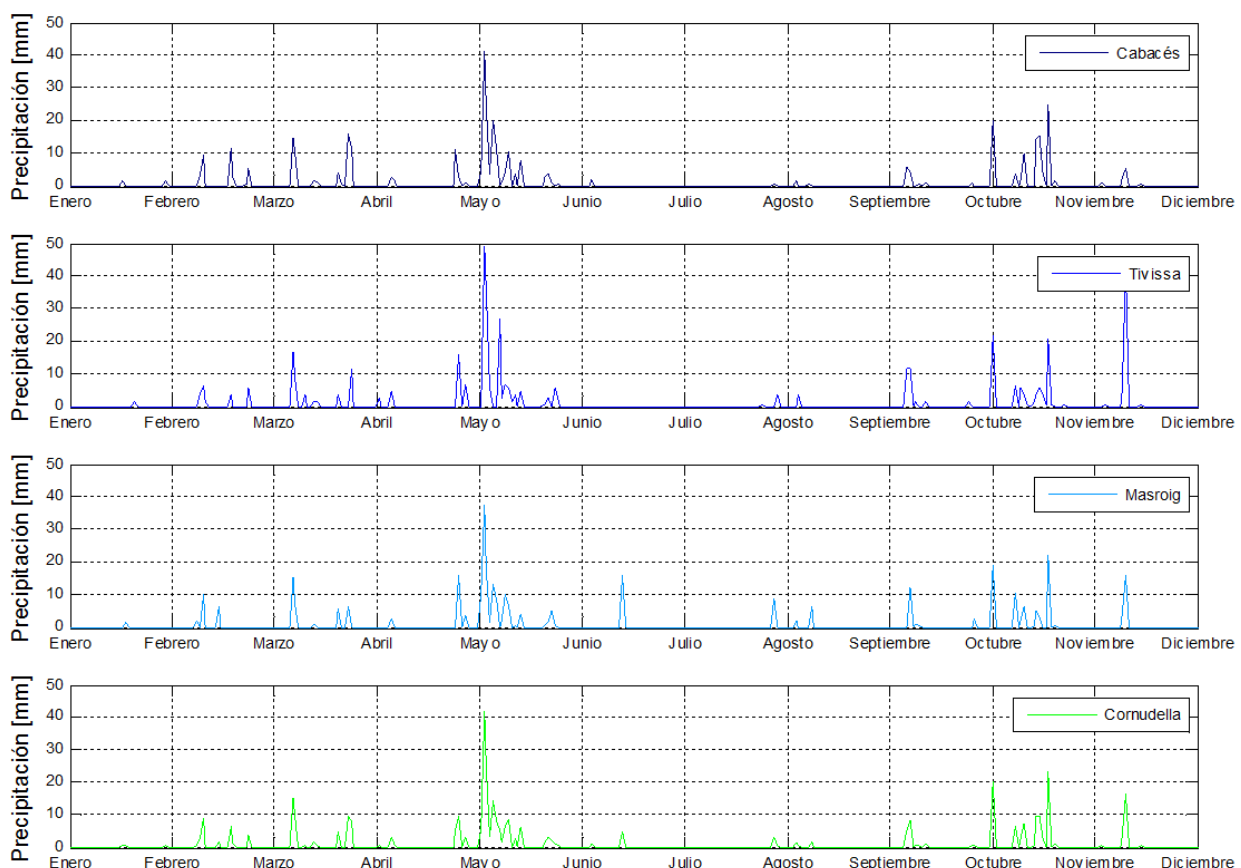


Figura 16: Año 1984 reconstruido para Cornudella a partir de las series (de arriba abajo): Cabacés. Tivissa y Masroig. Precipitación media diaria.

De la Figura 16 interesa comprobar que los 3 pluviómetros usados para la reconstrucción de la serie de Cornudella presentan una gran correlación, por lo que es asumible proceder a su extrapolación. La uniformidad espacial de la lluvia que puede desprenderse de la comparativa arroja confianza sobre la hipótesis que se asume en el modelo, donde la lluvia se considera idéntica en todos los puntos de la cuenca vertiente al embalse. Sin embargo, no existe información pluviométrica en las montañas de Prades, punto más elevado de la cuenca, y donde sí puede existir una irregularidad que haga subestimar la precipitación total.

Así, mediante este procedimiento se ha reconstruido la serie de precipitaciones diarias desde enero de 1984 hasta octubre de 2008. La serie temporal de precipitación reconstruida se muestra en la siguiente figura:

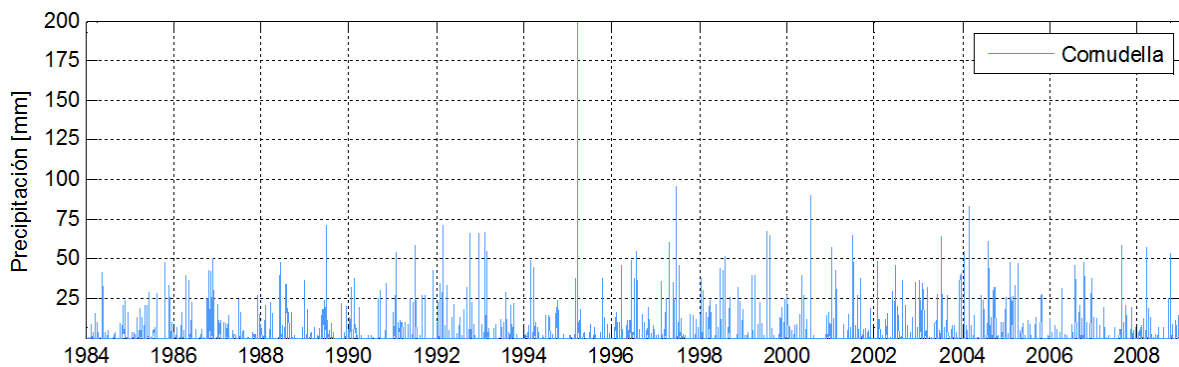


Figura 17: Serie temporal de lluvia media diaria reconstruida en el pluviómetro de Cornudella.

El evento de precipitación más relevante con diferencia es el pico registrado en octubre del año 1994, donde se registraron precipitaciones de más de 400mm en solamente 72 horas.

7.1.3 Temperatura

En cuanto a la temperatura, tanto la distribución espacial como temporal también son irregulares. En la Tabla 10 se resumen las características estacionales de la temperatura según el Atlas Climático Digital de Cataluña, entre los años 1951 y 1999:

Tabla 10: Resumen de temperaturas estacionalmente para los años 1951 y 1999. Adaptado del Atlas Climático Digital de Cataluña.

Periodo	Mínima [°C]	Máxima [°C]	Media [°C]
Anual	8.3	18.3	13.3
Invierno	2.1	10.1	6.1
Primavera	6.2	17.0	11.6
Verano	15.4	27.1	21.2
Otoño	9.3	18.8	14.1

En la Figura 18 se muestra la variabilidad espacial anual para los años 1951-1999 de la temperatura y la precipitación, junto con el coeficiente de variación de la lluvia, definido como el cociente entre la desviación típica y la media, $\frac{\sigma}{\mu} \cdot 100$ [%].

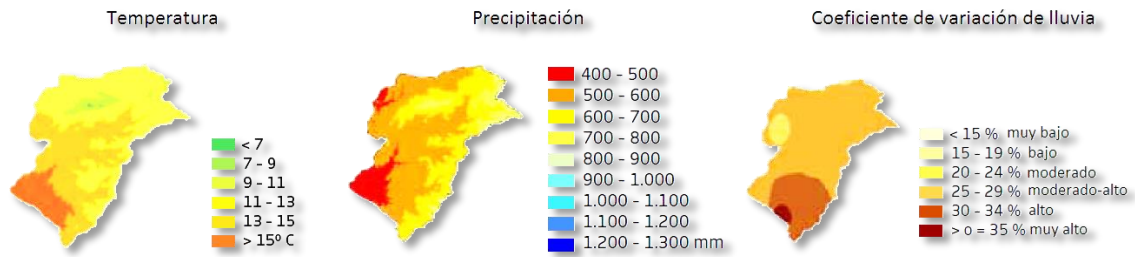


Figura 18: Variabilidad espacial anual de la Temperatura, Precipitación y su Coeficiente de Variación.
Adaptación de ACCUA (2011).

Con todo ello quiere expresarse que se debe considerar siempre la variabilidad tanto espacial como temporal de las variables a la hora de construir, calibrar y validar el modelo, para verificar si son asumibles las hipótesis tomadas. Un análisis más profundo se realiza en el apartado 9.1.2: *Evapotranspiración*.

7.1.4 Usos del suelo

A continuación se muestra en la Figura 19 la distribución de usos del suelo según el Corine Land Cover 2000 clasificados según el nivel 3 de particularización. El porcentaje de área dedicado a cada uso se resume en el gráfico de la Figura 20:

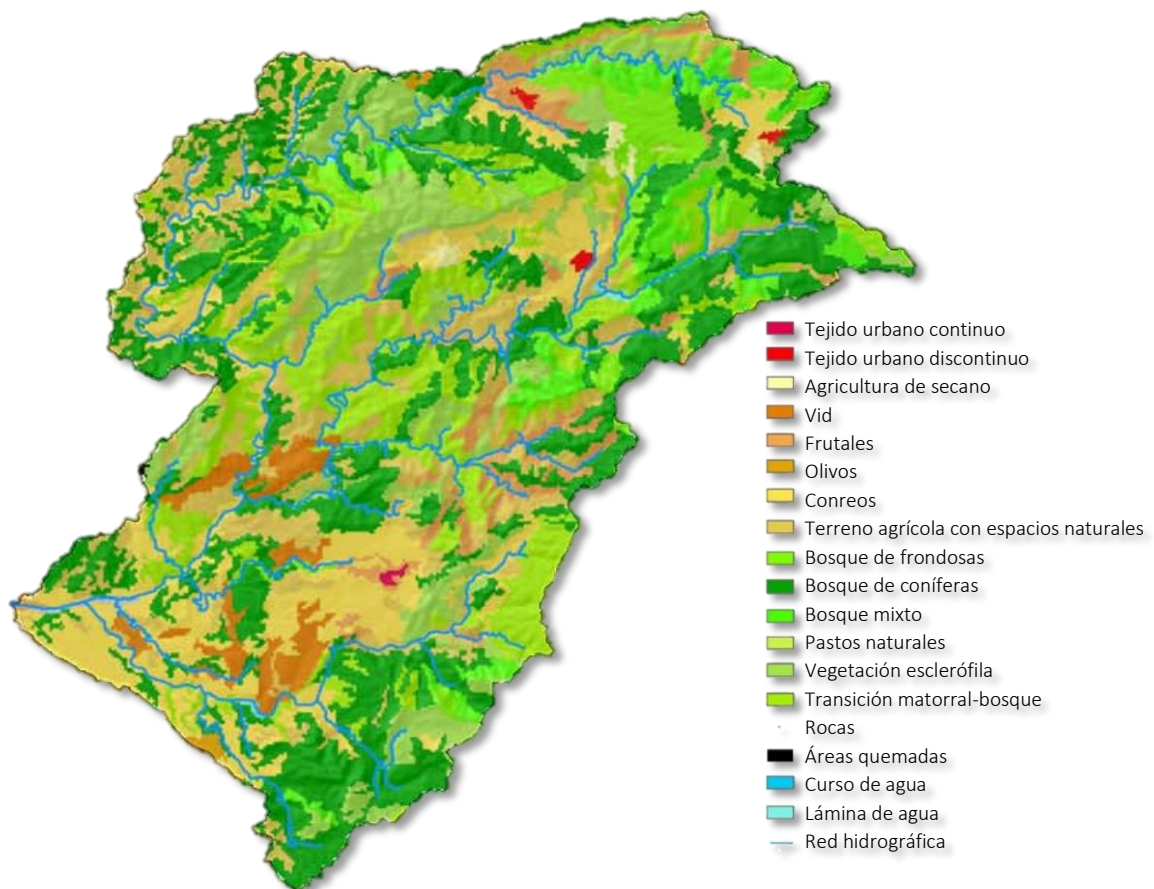


Figura 19: Usos del suelo en la Cuenca de Siurana, al nivel 3. Adaptado de CLC2000.

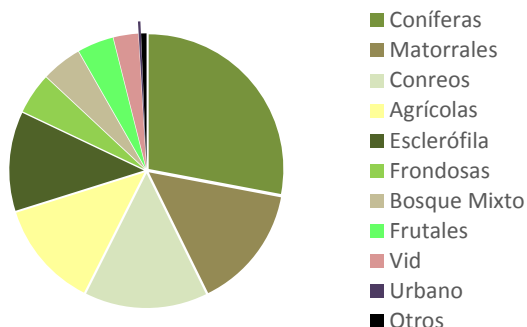


Figura 20: Porcentaje de usos en la Cuenca de Siurana.

En caso de realizar un análisis temporal retrospectivo, hay que tener en cuenta los cambios sucedidos en los últimos años. En la Figura 21 se muestra la tendencia evolutiva de los grandes conjuntos de superficie, en porcentaje sobre el total. Se observa un incremento del ámbito forestal, mientras que la agricultura ha sufrido un retroceso. En cualquier caso, estos cambios no son influyentes en el grado de impermeabilización de la cuenca, por lo que no se consideran relevantes en el análisis retrospectivo.

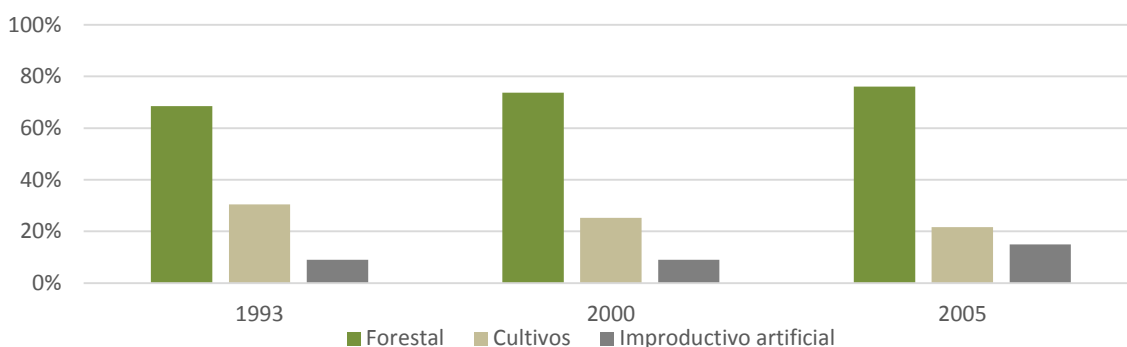


Figura 21: Evolución de las grandes cubiertas de suelo en los años 1993, 2000 y 2005 en la cuenca de Siurana. Datos de ACCUA (2011).

7.1.5 Hidrología superficial

En la cuenca existen únicamente dos estaciones de aforo:

- Una situada aguas abajo del embalse de Siurana y la derivación de caudal hacia la cuenca de Riudecanyes, en Cornudella de Montsant, regulada por el ACA;
- Otra aguas arriba del embalse de Guiamets, regulado por la Confederación Hidrográfica del Ebro (CHE).

El ACA dispone también de los registros de volumen diario almacenado en el embalse de Siurana, estimado a partir de la cota del agua de éste, y el registro de las derivaciones a Riudecanyes, donde se conoce también el caudal de salida diario. En cuanto al embalse de Margalef, el Departamento de Alimentación y Acción Rural dispone de una estimación del caudal de entrada diario en función de la cota de agua.

Las características de los embalses principales se resumen en la Tabla 11.

Tabla 11: Características de los embalses de la cuenca de Siurana. ACCUA (2011).

Embalse	Capacidad máxima (hm ³)	Superficie máxima (ha)	Año de construcción
Siurana	12.0	85.0	1973
Margalef	2.84	31.8	1990
Guiamets	10.0	62.0	1983

7.1.6 Hidrología subterránea

El estudio de ACCUA (2011) reveló los siguientes datos, Figura 22. La evaluación de la recarga profunda se realizó mediante el método del balance del agua en el suelo a partir del código Visual-Balan. ACCUA advierte que presentan incertidumbres elevadas dada la escasez de datos espacial y temporalmente, la alta variabilidad de precipitación en la serie histórica, y una estación de aforo poco adecuada para la evaluación de la escorrentía superficial. Sin embargo, los datos de calibración mostraron que los resultados obtenidos con Visual-Balan solo presentaban una desviación del 10% aproximadamente entre los valores reales medidos en los aforos superficiales y los valores obtenidos del estudio de la recarga distribuida a las masas subterráneas, luego el valor obtenido se encuentra entre los márgenes de error aceptables (Olivares, G. et al., 2011).

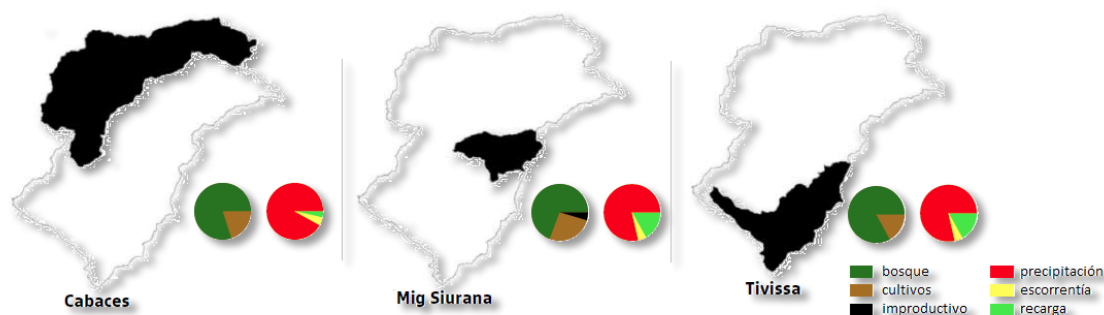


Figura 22: Estimación de la recarga en 3 subcuencas de la cuenca del Siurana. Adaptado de ACCUA (2011).

Como se aprecia, la componente subterránea del recurso tiene un peso superior a la escorrentía superficial. Dada la escasa precipitación, los recursos hídricos procedentes de la recarga subterránea son de elevada importancia en relación a las aguas superficiales.

7.2 La presa

La presa de Siurana se ubica en el término municipal de Cornudella de Montsant, comarca del Priorat en la provincia de Tarragona. Los trabajos a nivel de proyecto de la presa de Siurana dieron comienzo en septiembre de 1953. Las obras no se iniciaron hasta el año 1968 y

terminaron en el 1973. A continuación se resumen algunos datos técnicos procedentes del ACA (2016):

- Altura de la presa: 63 m
- Longitud de coronación: 274 m
- Superficie de la subcuenca: 60,4 km²
- Superficie del embalse: 67 ha
- Capacidad del embalse: 12 hm³

Una clasificación rápida de la presa puede obtenerse siguiendo la metodología del Ministerio de Medio Ambiente de 1996. Como paso previo ha sido necesario identificar las viviendas aisladas, núcleos urbanos y servicios susceptibles de ser afectados por la avenida provocada por su rotura. En base a dicha metodología se descarta la categoría C, pues puede afectar a viviendas aisladas y a servicios esenciales para la población como el puente de acceso al pueblo de Poboleda. Asimismo, para que la presa pueda ser considerada de clase B, su rotura debería afectar a un número de viviendas inferior al que se considera mínimo para constituir una afección grave a un núcleo urbano, establecido en 10 según la metodología citada, o a un número de vidas equivalente; por otro lado, no debería producir daños económicos o medioambientales importantes y solo podría afectar de manera no grave a alguno de los servicios esenciales de la comunidad. Debido a la afección grave que una hipotética rotura de la presa podría tener sobre el único puente de acceso al pueblo de Poboleda, la presa no puede clasificarse como B, luego se propone una clasificación A para la presa de Siurana (Marín, 2006).

7.3 El embalse

Actualmente el pantano abastece de agua a otro pantano cercano -el de Riudecanyes- y suministra agua para el regadío y para abastecer las poblaciones del *Baix Camp*. Paralelamente, el pantano se ha constituido en un centro turístico donde los habitantes de la zona y numerosos visitantes practican diversos deportes y actividades lúdicas acuáticas, tales como pesca, navegación, baño y otros usos recreativos.

Se dispone de los datos diarios de entrada y salida del embalse entre los años 1971 y 2008. El conjunto de datos se muestra en la Figura 23:

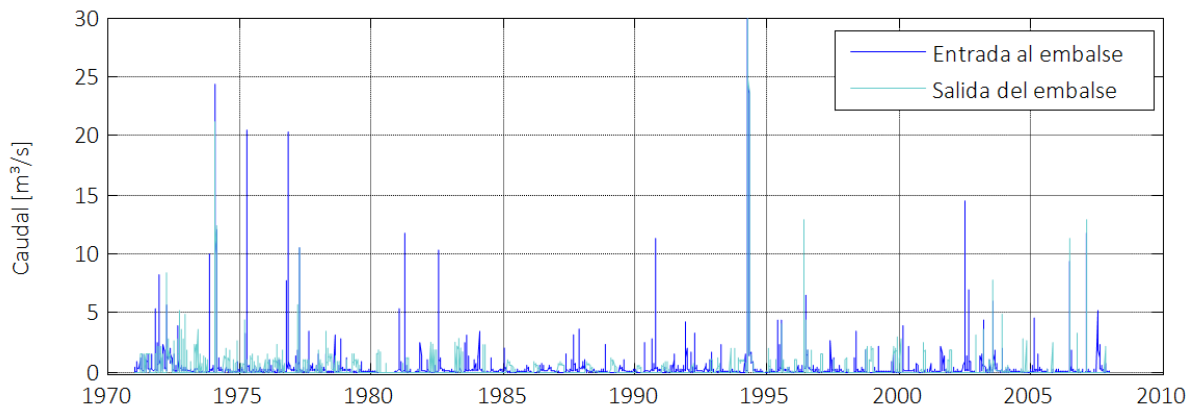


Figura 23: Serie temporal de entradas y salidas diarias al embalse de Siurana.

En la figura anterior se ha cortado el eje de ordenadas para poder apreciar mejor la distribución, dado que el evento extremo de octubre de 1994 originó entradas y salidas de $135.4 \text{ m}^3/\text{s}$ y $83.3 \text{ m}^3/\text{s}$ respectivamente.

También se posee el registro de volumen almacenado y la cota alcanzada por el embalse de manera diaria durante el mismo periodo de tiempo:

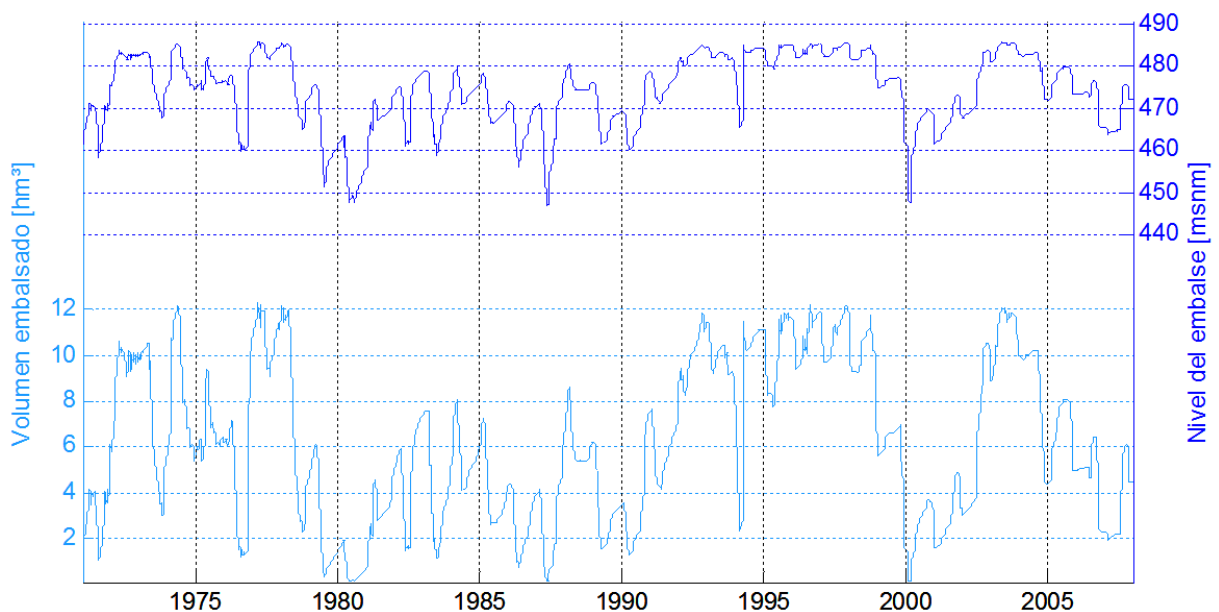


Figura 24: Evolución del nivel del embalse y volumen embalsado para la serie disponible de 1971 a 2008.

Resulta evidente la correlación volumen-nivel de embalse, pues a partir de una de ellas la otra queda predeterminada. Pese a no conocerse la geometría del fondo del embalse para parametrizar dicha relación, los registros empíricos nos permiten inferir una relación polinómica entre ambas:

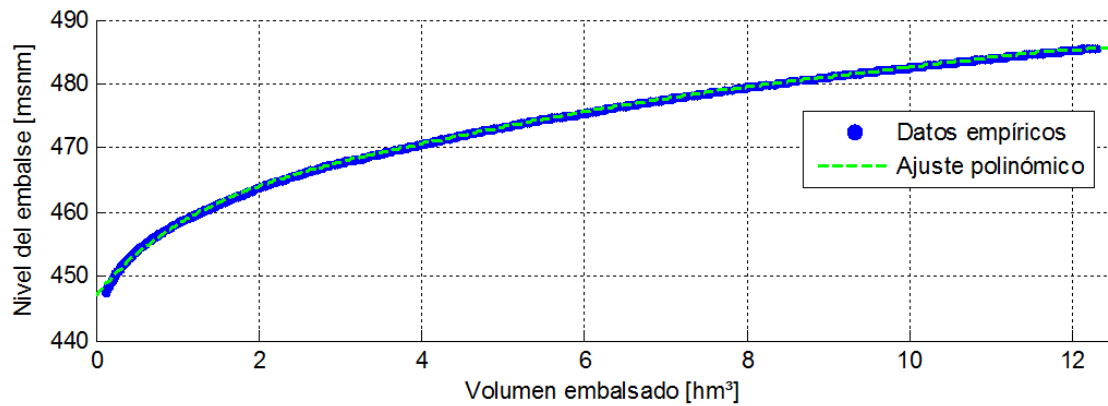


Figura 25: Relación Volumen-nivel del embalse y ajuste polinómico de 6º orden.

La ecuación que rige el ajuste es la siguiente:

$$\text{Nivel [msnm]} = \alpha_0 + \alpha_1 \cdot V + \alpha_2 \cdot V^2 + \alpha_3 \cdot V^3 + \alpha_4 \cdot V^4 + \alpha_5 \cdot V^5 + \alpha_6 \cdot V^6 \quad [\text{hm}^3]$$

Dónde :

$$\alpha_0 = 446.97677686 ; \alpha_1 = 15.02647562 ; \alpha_2 = -4.86057268 ; \alpha_3 = 1.015215 ;$$

$$\alpha_4 = -0.117172 ; \alpha_5 = 6.89566 \cdot 10^{-3} ; \alpha_6 = -1.6158 \cdot 10^{-4}$$

Se ha creído oportuno expresar explícitamente la cantidad de decimales necesaria para el correcto ajuste, puesto que la polinómica de sexto orden resulta muy sensible a los mismos.

7.4 Las poblaciones

Para analizar la evolución en el tiempo de la disponibilidad de agua en la cuenca, es necesario conocer detalladamente los usos actuales, lo que permitirá definir para cada zona las extracciones superficiales y subterráneas, así como los retornos de agua.

El uso del agua puede tener carácter consuntivo o no consuntivo:

- Uso no consuntivo: la práctica totalidad del agua utilizada vuelve a la cuenca en condiciones de calidad y tiempo similares a las existentes en el punto de captación. Ejemplo de ello son centrales hidroeléctricas, acuicultura y refrigeración de centrales de energía.
- Uso consuntivo: las extracciones de agua no retornan al medio de origen ni en calidad ni en cantidad. Ejemplo de ello son las aguas de uso urbano, industrial, agrícola, ganadero y recreativo.

La base de datos del 2007 de la ACA determina para cada municipio la cantidad y el origen del agua consumida. El estudio del ACCUA (2011) estimó para 2008 el volumen de agua según una clasificación por usos. Los datos fueron a su vez extraídos del padrón de 2008 de IDESCAT

(Instituto de estadística de Cataluña), la dotación urbana equivalente municipal en alta de 2007, la cartografía agrícola del DUNSIGPAC (Declaración única agraria y sistema de información geográfica de parcelas agrícolas) de 2007, y el MCSC (Mapa de cubiertas del suelo de Cataluña) de 2005. Los resultados se muestran en la Tabla 12, donde se observa que el 95% del uso del agua es destinado a agricultura:

Tabla 12: Estimación del volumen de agua por tipo de extracción para usos consuntivos. ACA (2007).

Hm ³ /año	Urbano	Industrial	Agrícola	Ganadero	Recreativo	Total
Superficial	0.9	0.0	17.7	0.1	0.0	18.7
Subterráneo	0.1	0.0	2.4	0.1	0.0	2.6

7.5 Legislación vigente

Las imposiciones legales tienen su origen primero en la Directiva europea Marco del Agua (DMA 2000/60/CE). Dicha directiva está transpuesta a la legislación española mediante el texto refundido de la Ley de Aguas, aprobado por el RDL 1/2001, de 20 de julio de 2001, modificado por la ley 62/2003, de 30 de diciembre de 2003, de medidas fiscales, administrativas y de orden social.

La ley 11/2005, de 22 de junio, de modificación de la ley 10/2001 del PHN, modifica también el texto refundido de la Ley de Aguas (RDL 1/2001), en su artículo 42.1.b.c', estableciendo como contenido de los Planes hidrológicos de cuenca, entre otras cuestiones, los caudales ecológicos, a los que define como "los que mantienen como mínimo la vida piscícola que de manera natural habitaría o podría habitar en el río, así como su vegetación de ribera".

En este marco, y para cumplir el que establece el texto refundido de la ley de aguas, así como la DMA, se aprobó en 2007 el Reglamento de la Planificación Hidrológica (RD 907/2007).

De forma paralela, la Instrucción de Planificación Hidrológica (MIMAM – Ministerio de Medio Ambiente, 2008) establece los criterios técnicos para la homogeneización y sistematización de los trabajos de elaboración de los planes hidrológicos de cuenca, de acuerdo con el artículo 82 del Reglamento de Planificación Hidrológica.

En el marco legislativo autonómico destaca también la aprobación del Decreto 380/2006 de 10 de octubre, por el cual se aprueba el Reglamento de la planificación hidrológica.

De este modo termina el primer estudio de la cuenca del río Siurana para mayor conocimiento de los condicionantes y las necesidades que existen en el dominio de estudio del presente trabajo.

8. Modelo topo-hidrográfico

A la vista de la descripción física del proceso descrita en el apartado 4.1: *El Ciclo Hidrológico*, resulta obvia la necesidad de llevar a cabo dos tipos de modelación, antes de configurar el conjunto como un programa de cálculo. Así, una primera modelación debe hacer referencia a la morfología y a las características físicas del dominio de estudio, mientras que una segunda modelación, más compleja y profunda que la anterior, debe centrarse en la representación de los procesos hidrológicos que tienen lugar en la cuenca previamente caracterizada.

Entonces, para elaborar un modelo hidrológico, el nivel más básico es obtener el mapa topográfico de la cuenca. Para ello, se dispone de los datos gratuitos del ICGC, que ofrece una gran cantidad de información de distintos tipos. Se menciona que los datos del ICGC poseen licencia CC-BY 3.0 ES la cual permite, entre otros, el uso comercial de los datos.

Se ha escogido la categoría de modelos digitales de elevaciones (MDE) de resolución mayor, obteniendo el nivel del terreno por cada región de 5 x 5 metros. La información se suministra en formato ASCII y de modo sencillo pueden convertirse a formato Raster, consistente en un mapa de píxeles con un valor numérico en cada uno. Se han descargado los mapas 416, 417, 444, 445, 471, 472, 497 y 498, que engloban y exceden la región de estudio (Figura 26). Una vez delimitada la cuenca, se desestimarán las regiones sobrantes.

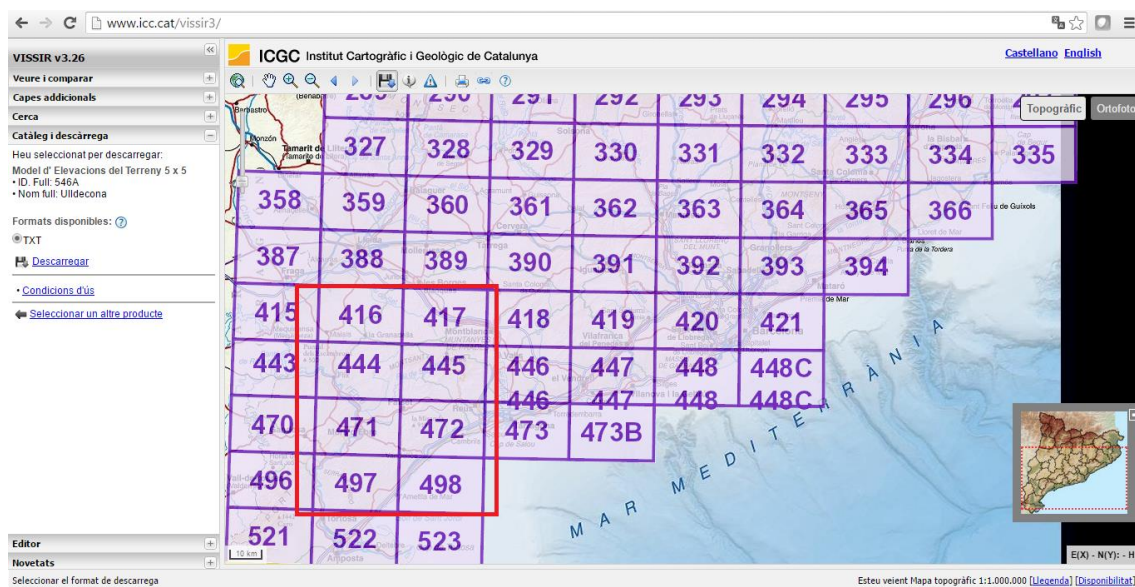


Figura 26: Ubicación de los mapas MDE 5x5 descargados del ICGC.

El programa utilizado para el pre-procesado de datos topográficos de la cuenca ha sido ArcMap, junto con la extensión HEC-GeoHMS de la US Army Corps of Engineers, la cual permite un rápido acople entre los datos GIS y la interfaz del modelo hidrológico HMS.

8.1 Mosaico de mapas

Una vez introducidos los mapas de modo georreferenciado en ArcMap, se ha generado un mosaico de todos ellos para obtener un único mapa Raster de la región de estudio. En los solapes entre mapas, se ha aplicado el algoritmo *Blend*: el valor de un píxel que se encuentra en un área de solape se obtiene mediante una media ponderada dependiente de la distancia del píxel al borde de cada mapa solapante. Con ello se quiere poner de manifiesto que cuanto más cercano es un valor al borde de la capa, menos fiable es éste por posibles distorsiones a causa del contorno. Por ejemplo, en caso de equidistancia al borde de cada capa, se aplica la media aritmética de los valores. En todo caso, no es esperable que se produzcan significativas diferencias entre mapas. A modo de ejemplo, se menciona que en un píxel aleatorio de solape triple entre capas se obtuvieron los valores de altura 287.73999m, 286.269989m y 287.73999m, lo que confirma la bondad de cualquier ajuste entre solapes.

8.2 Llenado de depresiones

Seguidamente se aplica la herramienta *Fill*, que genera un modelo sin depresiones, donde no pueda acumularse agua. De este modo asegura la continuidad del flujo hasta la salida de la cuenca. El algoritmo compara la cota de cada píxel con sus 8 vecinos, y si ésta fuera inferior a las colindantes, la igualará a la menor de ellas. Esto es asumible en grandes áreas en comparación con el tamaño de píxel. Cuando se produce lluvia, el volumen que entraría en la depresión de un píxel desplazaría afuera la misma cantidad de volumen. Al tratarse además del tamaño de un píxel, ese volumen no es relevante, y esta hipótesis nos permite la correcta generación de las líneas de flujo y trazado de subcuencas.

8.3 Dirección del flujo

Una vez tenemos un modelo sin depresiones puntuales, se aplica el algoritmo *Flow Direction* a cada píxel. Consiste en hallar, para cada píxel, la dirección de máxima pendiente, hacia donde se asume que fluirá el agua en caso de escorrentía.

Para ello, se compara la cota de cada píxel con la de sus 8 colindantes. Así, se tomará como dirección del flujo en ese píxel aquella que conduzca al píxel vecino con la mayor pendiente posible. De este modo, se elabora un nuevo mapa Raster, donde cada píxel puede tener un valor de entre ocho distintos, según sea la dirección de flujo en él, como se muestra en la Figura 27.

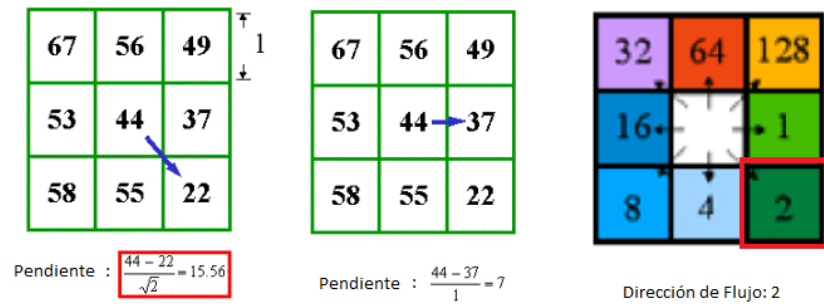


Figura 27: Algoritmo Flow Direction en un píxel. Adaptado de UPC.

El resultado del mapa de direcciones de flujo a partir del mosaico inicial se muestra en la Figura 28:

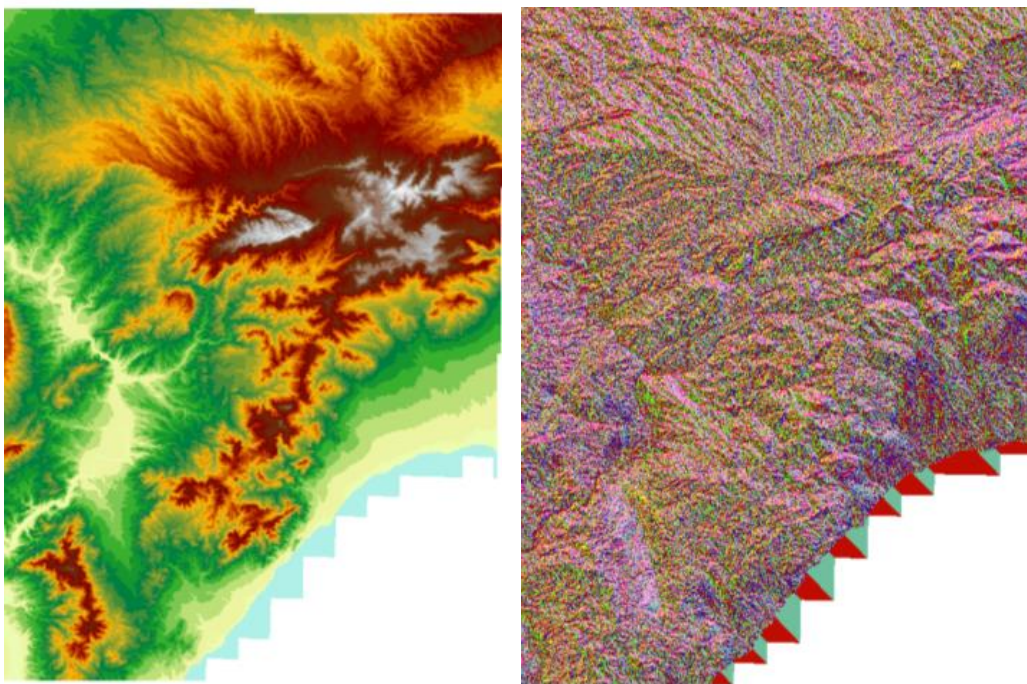


Figura 28: Mosaico bruto y dirección de flujo para el dominio de estudio.

8.4 Acumulación de flujo

El siguiente paso, previo a la definición de la red de drenaje, consiste en calcular la acumulación de flujo en cada píxel, esto es, caracterizar cuántos píxeles del mapa desembocan tarde o temprano en un cierto píxel. Esto es sencillo si previamente tenemos la red de flujo o *Flow Direction*. El algoritmo está implementado en ArcGIS como *Flow Accumulation*.

Llegados a este punto, se tiene un mapa en el que el valor de cada píxel indica la cantidad de píxeles que tiene aguas arriba, lo que es de suma utilidad.

Por ejemplo, multiplicando el valor de acumulación de flujo de un píxel por su tamaño, podemos saber el área exacta de la cuenca hidrográfica asociada a ese punto. Podemos

imaginar ahora que, si se concibe una lluvia uniforme en toda la cuenca, multiplicando la intensidad por la duración del evento y por el área de la cuenca asociada al punto, obtendremos el volumen total de agua que finalmente ha circulado a través del píxel. Podemos pensar ahora que, si ese píxel se tratase de la entrada a un embalse, habríamos obtenido la recarga total del embalse tras el evento de lluvia (sin tener en cuenta los procesos de pérdidas).

Sin embargo, no solamente estamos interesados en el volumen final de recarga, sino en su distribución temporal y evolución espacial en el terreno. Es por ello que el tratamiento aquí expuesto se aplicará a unidades de cuenca inferiores, donde sí puedan aplicarse las hipótesis de uniformidad previamente comentadas.

8.5 Red de flujo

Con este fin, el siguiente paso a dar es establecer la red de drenaje de la cuenca. Se entiende por red de flujo el lugar geométrico de los puntos que poseen una gran cantidad de acumulación de flujo en comparación con el resto. Por ejemplo, si hablamos de un conjunto montañoso, la acumulación en las cumbres será nula, en las laderas existirá una baja acumulación, y en los valles encontraremos los valores de *Flow Accumulation* más elevados.

Para ello, se debe determinar un umbral a partir del cual se considera que la acumulación es suficientemente grande como para ser tomado como cauce. Sin embargo, el concepto de “gran cantidad de acumulación” admite discusión. Un umbral excesivamente bajo tomará en cuenta únicamente las regiones de muy elevada acumulación de flujo, desestimando los tramos de cauce de la parte alta de la cuenca. Por el contrario, un umbral muy bajo tomará en cuenta excesivos cauces, generando un número de cuencas demasiado elevado y probablemente innecesario.

De este modo, se requiere un proceso iterativo para determinar la red de flujo que más se adapte a las necesidades. En un primer momento, se tomó la recomendación del manual de HEC-GeoHMS de tomar como valor umbral el 1% del valor máximo de acumulación. Al resultar una red demasiado simplificada, se bajó a un 0.1% y posteriormente a un 0.01%. Los resultados se aprecian en la Figura 29.

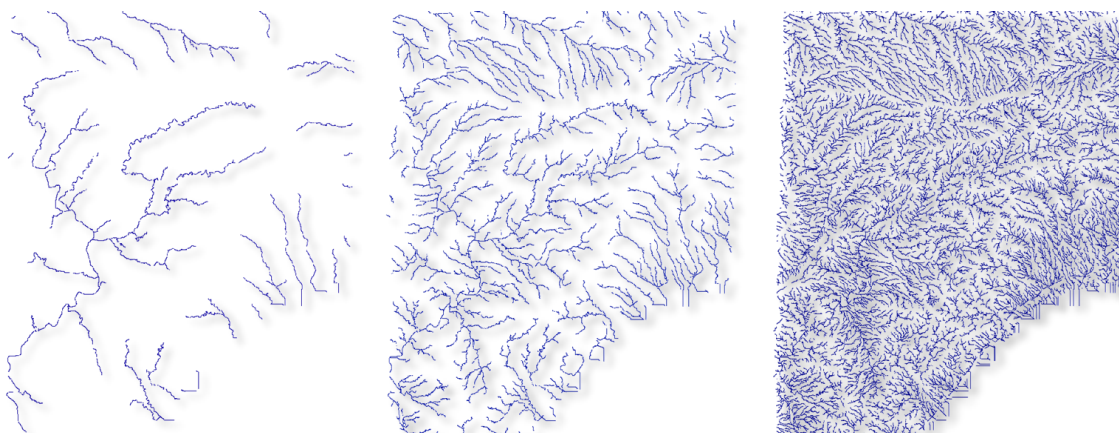


Figura 29: Red de flujo para distintos umbrales, de izquierda a derecha: 1%, 0.1% y 0.01% del total de área acumulada.

La red obtenida a partir del 0.01% se consideró demasiado compleja, por lo que finalmente se tomó la red de flujo obtenida con el umbral de 0.1% del área.

8.6 Delimitación de las subcuencas

Las cuencas pueden ser delineadas automáticamente a partir del modelo de elevación digital, utilizando como entrada la información de dirección de flujos, lo cual posibilita conocer el área de contribución de agua. Asimismo, a partir de una cuenca dada es factible delinear nuevas subcuencas. Debido a que muchas subcuencas pueden resultar de dimensiones muy pequeñas y sin interés para la aplicación, el usuario tiene la posibilidad de especificar el tamaño mínimo deseado para las subcuencas. Los límites de distintas cuencas son comúnmente requeridos para todo tipo de modelado hidrológico. Utilizando herramientas de ArcGIS es posible combinar dichos límites con información de suelos y uso de la tierra para obtener información estadística para cada cuenca para, por ejemplo, predecir la pérdida de sedimentos o importantes inundaciones.

Para delimitar las subcuencas que conforman el dominio de estudio, el siguiente paso es segmentar la red en tramos de cauce. Posteriormente se generan los polígonos asociados a las cuencas hidrográficas vertientes a cada uno de los tramos de cauce, obteniendo finalmente el mapa de subcuencas asociado a la red de flujo que se ha creído conveniente. Debe volverse a mencionar que este mapa de subcuencas no es único, sino que su resolución dependerá del criterio y necesidades del modelador. En el presente caso, el dominio resultó finalmente dividido en 1115 subcuencas. Una vez generadas las cuencas, se tomaron únicamente en cuenta aquellas que tarde o temprano aportaran agua al fin del río Siurana, en su encuentro con el Ebro. De este modo resultó una discretización en 179 cuencas. El mapa de subcuencas resultante para el dominio inicial se muestra en la Figura 30:

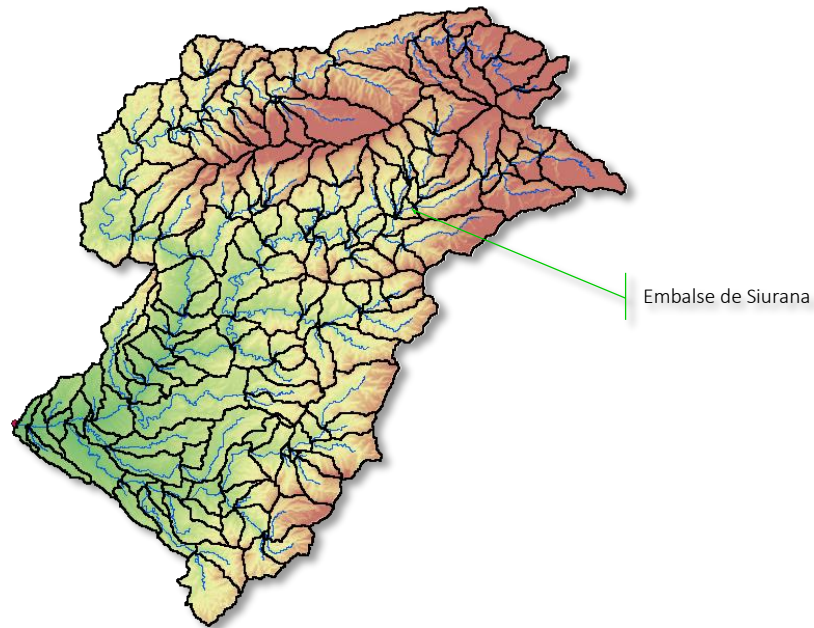


Figura 30: Discretización de la cuenca completa del río Siurana en 179 subcuencas.

Como último paso para la delimitación de la cuenca objeto de estudio, se seleccionan solamente aquellas que desembocan al embalse de Siurana. Ello resultó en un mapa de 16 subcuencas que se muestra en la Figura 31:

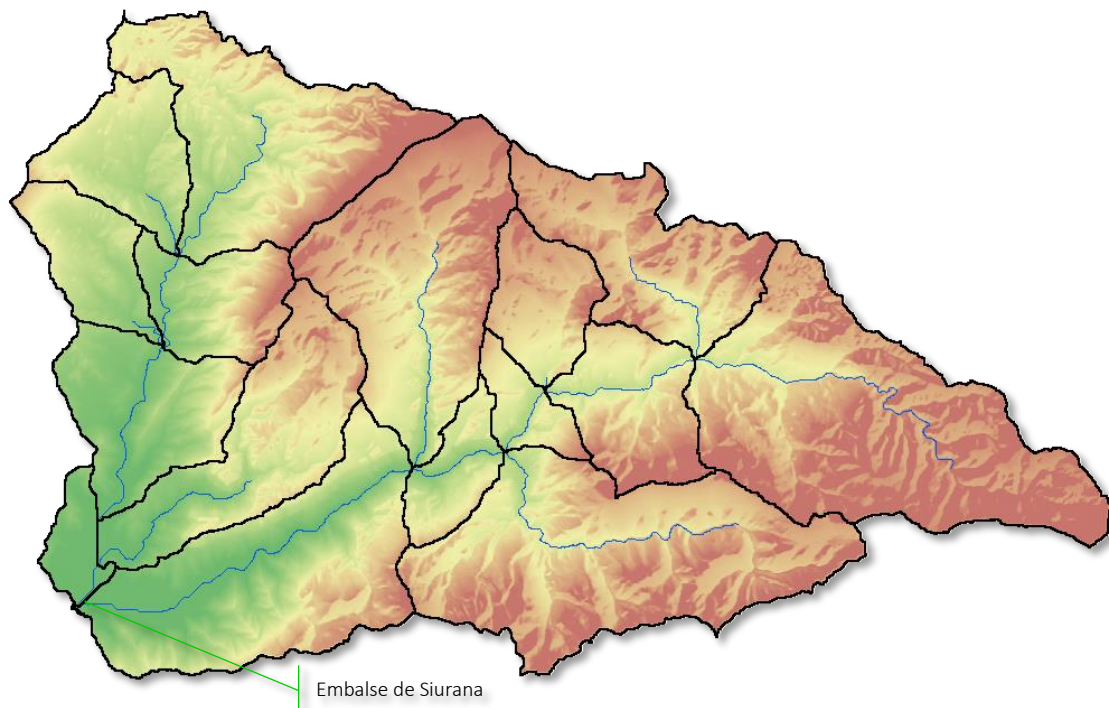


Figura 31: Discretización de la cuenca vertiente al embalse de Siurana en 16 subcuencas.

De este modo queda finalmente delimitada la cuenca vertiente al embalse, objetivo que se perseguía en este apartado. El resumen esquemático del proceso seguido se muestra en la Figura 32.

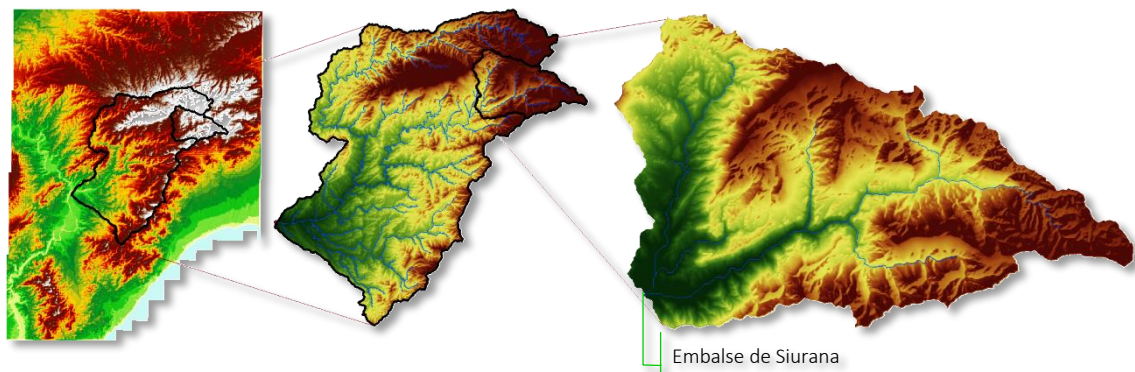


Figura 32: Evolución del dominio de estudio. De izquierda a derecha: Mosaico inicial, Cuenca del río Siurana, Cuenca vertiente al embalse de Siurana.

A continuación se muestra un ejemplo de la bondad de los resultados obtenidos para la red de flujo, comparando el cauce obtenido para el *Barranc de la Foradada* con su geometría obtenida en *google maps*:

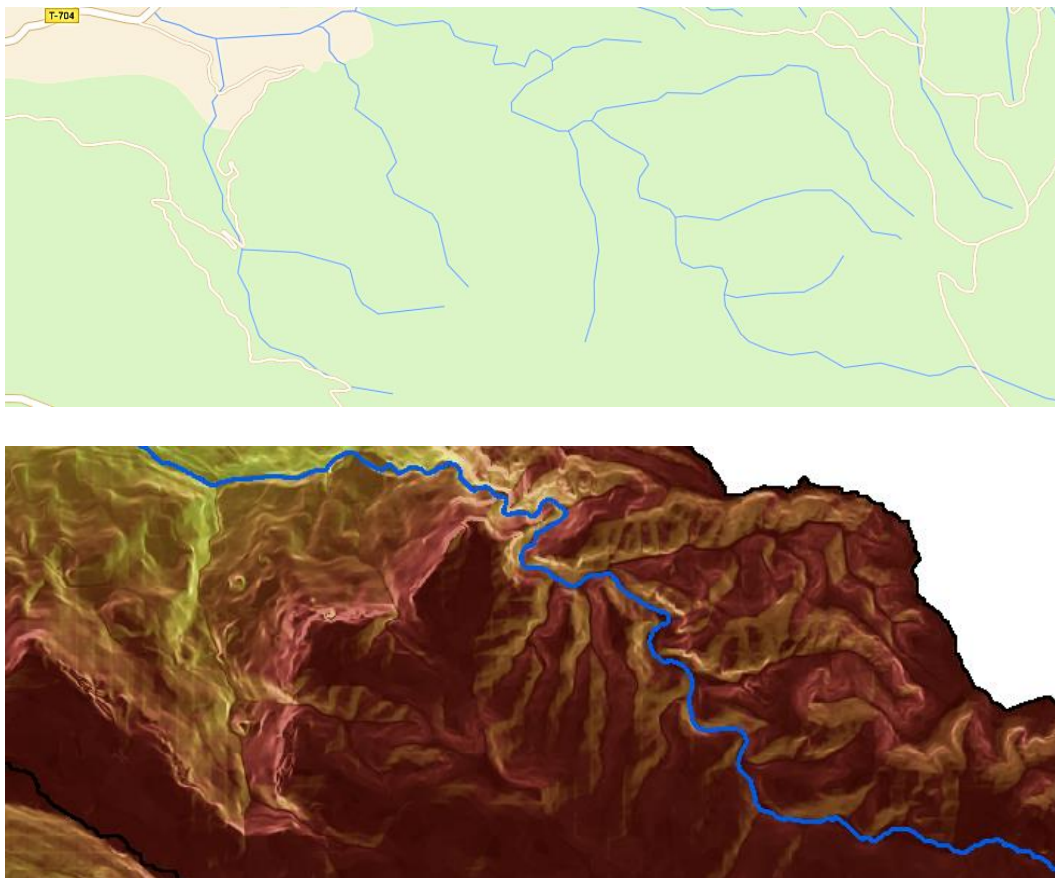


Figura 33: Comparativa del Barranc de la Foradada observado en *google maps* y obtenido mediante ArcGIS.

8.7 Estimación de parámetros topográficos

Mediante HEC-GeoHMS se puede obtener un gran número de características topográficas de las subcuencas y sus cauces principales, de donde pueden estimarse los parámetros hidrológicos necesarios. Estos deberían a su vez ser comparados y verificados con información de campo previo a la calibración del modelo. Los valores de principal interés son:

- Área por subcuenca;
- Posición del centroide por subcuenca;
- Pendiente media por subcuenca;
- Desnivel máximo por subcuenca;
- Longitud por tramo de cauce;
- Pendiente media por tramo de cauce;
- Conectividad entre elementos de la cuenca;
- ...

El software integra múltiples algoritmos de cálculo, desde simples promedios hasta formulaciones empíricas como la fórmula de Van Haveren (1986) para el cálculo de la pendiente media de una cuenca. A continuación se exponen algunos de los resultados gráficos:

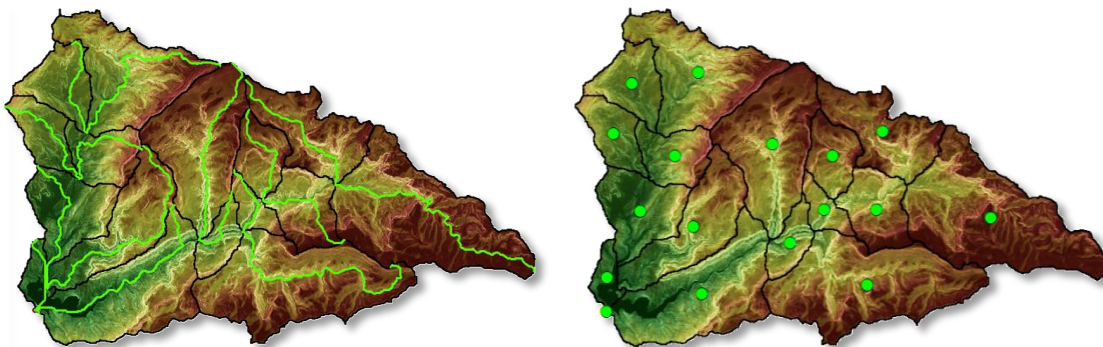


Figura 34: Izquierda: cauce más largo por subcuenca. Derecha: centroide por subcuenca.

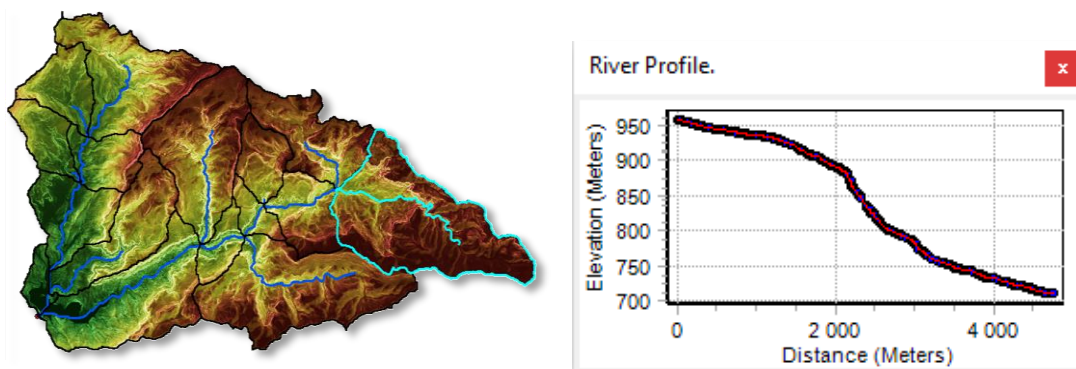


Figura 35: Perfil del cauce principal de la cuenca W260.

Se debe mencionar que el tiempo de cálculo de estos procesos fue muy elevado debida a la alta resolución del MDE, excediendo en ocasiones las 2 horas por paso.

Los parámetros del terreno que no se han podido conocer a partir del modelo topo-hidrográfico desarrollado en ArcGIS se han deducido o estimado en base al mapa de usos del suelo del *Centre de Recerca i Aplicacions Forestals* de Cataluña (CREAF), y de manera acorde y coherente con la literatura existente en cuanto a modelación numérica, como se describe en el apartado 9.1: *Modelado por procesos*.

El mapa de usos del suelo del CREAF se muestra a continuación para el ámbito de estudio:

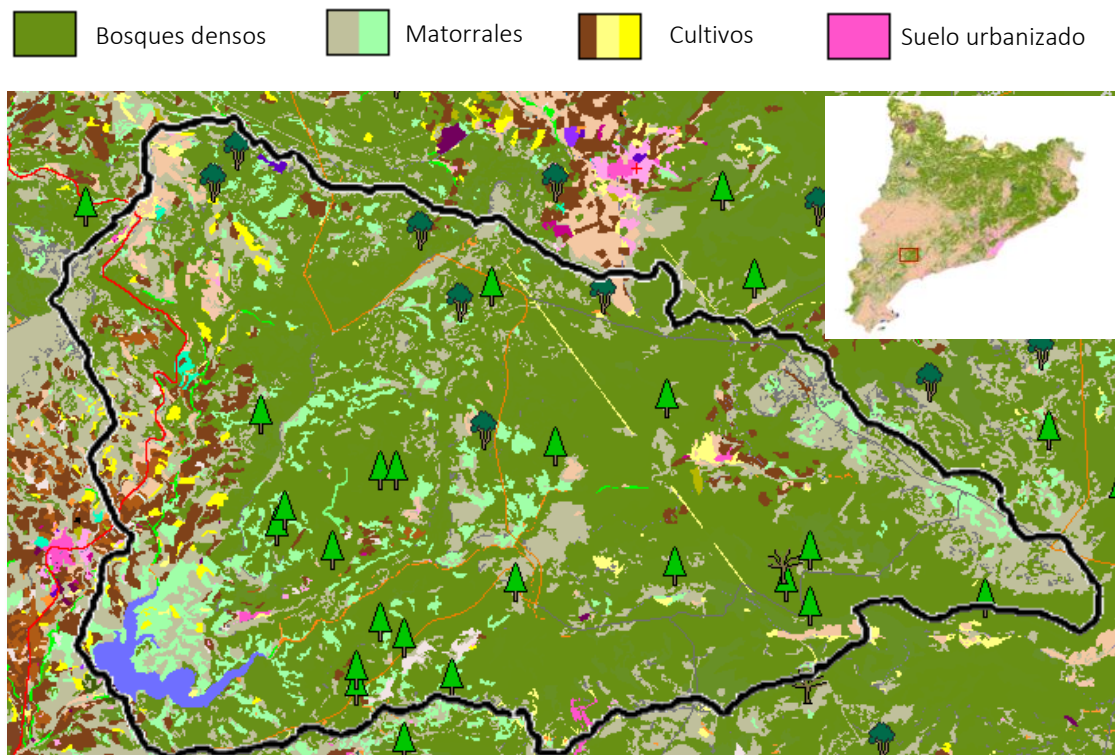


Figura 36: Usos del suelo de la cuenca asociada al embalse de Siurana. Adaptado de CREAF.

9. Modelo hidrológico

En este apartado se desarrollarán las posibilidades que el programa HEC-HMS ofrece en cuanto a modelación de procesos hidrológicos, y las peculiaridades planteadas en su utilización para el cálculo de los recursos hídricos disponibles en un embalse simulando procesos continuos.

Se precisarán con cierto grado de detalle los diferentes modelos utilizados para representar las pérdidas de agua por infiltración y evapotranspiración, la transformación del exceso de precipitación en escorrentía superficial, el desarrollo del flujo base, y el tránsito de hidrogramas a lo largo de tramos de cauce, identificando además con claridad los parámetros de los que depende cada uno de ellos.

HEC-HMS consta de una amplia gama de modelos y métodos que permiten construir un modelo hidrológico. La selección de estos ha dependido directamente del tipo de información disponible en el estudio y de los objetivos propuestos a cumplir.

Sobre la base del ciclo del agua descrito en el apartado 4.1: *El Ciclo Hidrológico*, el diagrama de flujo que resume los procesos a caracterizar se muestra continuación:

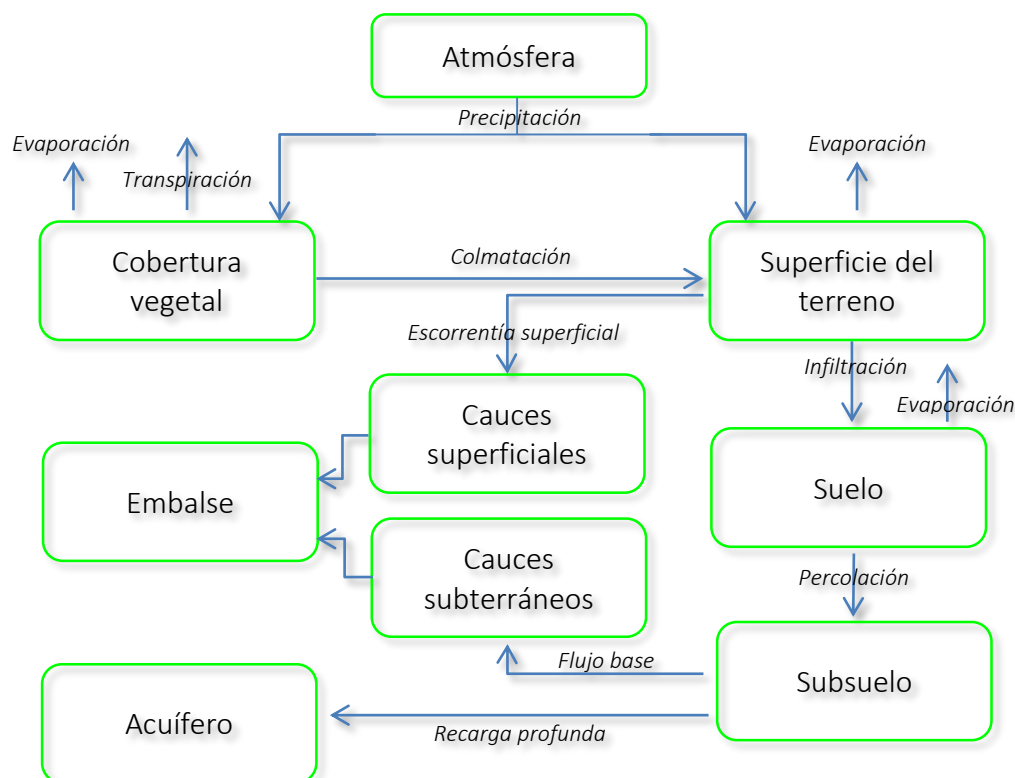


Figura 37: Diagrama de flujo de los procesos hidrológicos a modelar.

Para modelar el anterior diagrama de flujo a partir de un modelo topo-hidrográfico, hay que tener muy presente el alcance del estudio que se pretende llevar a cabo. Así, hay casos en los que el objetivo se centra en determinar el área inundada con un cierto período de retorno. Ello lleva implícita, en cierta medida, la consideración de aguaceros de corta duración y gran intensidad, no siendo necesario considerar el movimiento del agua en las capas del suelo.

En el caso del presente estudio, por el contrario, se trata de evaluar los recursos hídricos superficiales disponibles, por lo que la ventana temporal debe ampliarse a años de modelación, de modo que se incluirán de forma natural episodios lluviosos de mayor o menor intensidad y duración, así como intervalos más o menos largos de ausencia de precipitaciones. En estos casos es imprescindible considerar, de manera detallada, los procesos de evapotranspiración, infiltración y percolación, así como la variación del contenido de humedad en el suelo y en el subsuelo de forma continua.

Con objeto de poder representar adecuadamente el comportamiento hidrológico de una determinada cuenca, es preciso, en primer lugar, llevar a cabo una representación numérica esquemática de la misma, que refleje, de la mejor manera posible, su morfología y las características de su red de drenaje en base a los procesos de la Figura 37. En dicha representación esquemática se utilizan generalmente diversos tipos de elementos, dentro de los cuales se desarrollan los procesos hidrológicos descritos en el apartado 4.1: *El Ciclo Hidrológico*. En este sentido, el programa HEC-HMS incluye diferentes tipos de elementos, que han sido ya definidos en el apartado 6.1: *HEC-HMS*. La combinación de estos tipos de elementos, con las adecuadas conexiones entre ellos, constituye finalmente la representación esquemática de la cuenca total:



Figura 38: Esquematzación de la cuenca del embalse de Siurana. Izquierda: ArcGIS. Derecha: HEC-HMS.

9.1 Modelado por procesos

Cada modelo generalmente tiene dos tipos de parámetros: parámetros físicos y parámetros del procedimiento. Los parámetros físicos representan las propiedades físicas de la cuenca hidrográfica, como son: área de la cuenca hidrográfica, pendientes de la superficie, superficies impermeables de la cuenca entre otros; los parámetros del procedimiento representan las

propiedades de la cuenca hidrográfica que no se miden directamente, como son: la profundidad efectiva de almacenamiento de agua en la superficie del suelo, la tasa efectiva del flujo lateral interno, el coeficiente de la tasa de no linealidad del control de percolación para el almacenamiento de aguas subterráneas, entre otros. Mientras que los primeros tienen un valor unívoco que puede obtenerse del modelo topográfico desarrollado en ArcGIS, los segundos pueden carecer de sentido físico o ser de extrema dificultad de medición. Es por ello que los parámetros de procedimiento deberán ser estimados y calibrados individualmente, para ser posteriormente validados en su conjunto.

Ante la imposibilidad de abordar de manera global la modelación del proceso de transferencia lluvia-caudal, se suele optar generalmente por analizar de manera individualizada diferentes aspectos parciales del proceso, para ser posteriormente agregados. Este es también el criterio adoptado en el programa HEC-HMS. En los siguientes subapartados se describen los procesos anteriormente planteados (Figura 37) de la siguiente manera:

- Se expone el proceso o fenómeno en cuestión;
- Se presenta y desarrolla el modelo de cálculo escogido para simular el proceso, así como los parámetros que intervienen en él;
- Se estiman justificadamente los valores iniciales de los parámetros para comenzar la calibración;
- Se realiza un análisis de sensibilidad de cada parámetro inicial, variando de forma individual un -20%, -10%, 10% y 20% sus valores, y manteniendo fijo el resto, con el fin de determinar si el parámetro verdaderamente aporta sensibilidad al modelo, y discernir si éste debe ser calibrado o no. El valor de referencia para evaluar la sensibilidad es el volumen final almacenado al finalizar la serie temporal.

Existen distintos criterios utilizados para la primera estimación: en aquellos que tienen un cierto sentido físico se trata de establecer relaciones con algunas características geomorfológicas de las cuencas; en otros se tienen en cuenta limitaciones o restricciones de tipo matemático; y otros se estiman directamente mediante criterios de tipo subjetivo, comparándolos con los adoptados en otros estudios similares.

El análisis de sensibilidad consiste en observar si un cambio en el valor del parámetro afecta de manera relevante el resultado. En caso afirmativo se dice que el modelo es sensible a estos parámetros. Si, por el contrario, el valor del parámetro no afecta en el resultado se dice que no existe sensibilidad. Los parámetros que no aporten sensibilidad al modelo pueden ser obviados del proceso de calibración, al no aportar información o diferencias significantes. Es por ello que el análisis de sensibilidad se ha realizado posteriormente a la estimación de los parámetros, pero previamente a su calibración.

Tanto el análisis de sensibilidad como la calibración del modelo se han realizado con la serie de datos de 1984 a 1994, mientras que la validación se ha hecho reservando los datos de 1998 a 2008. De este modo nos aseguraremos de que la validación es consistente y fiable, puesto que el modelo no habrá sido calibrado previamente con los datos de validación.

9.1.1 Precipitación

La precipitación constituye el input principal al proceso hidrológico antes descrito, esto es, no constituye ningún parámetro a calibrar, sino que es considerada como condición de contorno del sistema. La medición de la precipitación se efectúa por medio de pluviómetros. La altura de precipitación se expresa generalmente en mm e indica la altura del agua de lluvia que cubriría la superficie del suelo, en el área de influencia de una estación pluviométrica, si pudiese mantenerse sobre la misma sin filtrarse ni evaporarse.

Dado que la información disponible sobre la precipitación es limitada, tanto a nivel espacial como temporal, es necesario recurrir a algún procedimiento que permita establecer un modelo de precipitación acorde con el objetivo perseguido en cada caso. En este sentido, puede ser necesario disponer de datos de precipitación en forma de series continuas en períodos largos de tiempo, o bien, de hietogramas de diseño en períodos cortos de tiempo, según el objetivo de la modelación.

Para el establecimiento de hietogramas de diseño en períodos cortos de tiempo, el programa HEC-HMS contempla diferentes posibilidades, algunas de las cuales resultan un tanto sofisticadas. No obstante, se considera también la posibilidad de utilizar un hietograma definido por el usuario, basado generalmente en análisis estadísticos llevados a cabo sobre registros históricos en pluviómetros o pluviógrafos representativos. En algunos casos se establecen hietogramas sintéticos a partir de curvas Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF) de modo que se estudia la respuesta a un evento asociado a un periodo de retorno determinado. En otros casos, el hietograma es estimado directamente a partir de modelos de precipitación predefinidos.

Por otro lado, y siendo el caso del presente estudio, si se desea establecer un modelo hidrológico de aportaciones, la lluvia a utilizar debe ser esencialmente la misma que la producida en la realidad, con el fin de poder comparar posteriormente los resultados. En el caso de simulaciones de largos periodos, el programa HEC-HMS contempla diferentes posibilidades, según el tipo de distribución espacial que se considere para la precipitación en el conjunto de la cuenca o subcuenca objeto de análisis.

Existen diferentes alternativas para determinar el valor de la precipitación sobre el conjunto de la superficie, que establecen regiones de comportamiento uniforme a partir de la información puntual registrada en una serie de pluviómetros:

- Media aritmética o ponderada, con diferentes criterios de ponderación;

- Polígonos de Thiessen (fraccionamiento del espacio en áreas de influencia);
- Método de las isoyetas (establecer regiones de intensidad constante).

Si se considera que la distribución espacial de la precipitación no es uniforme, las alternativas que contempla el programa HEC-HMS son:

- Datos obtenidos mediante radar, que proporcionan los valores registrados directamente sobre una cuadrícula.
- Interpolación en cada punto las lecturas de distintos pluviómetros mediante un algoritmo de media ponderada, con coeficientes de ponderación que tienen en cuenta el inverso del cuadrado de la distancia al pluviómetro correspondiente.

En el caso del presente trabajo, dado que la cuenca asociada al embalse de Siurana dista mucho de los pluviómetros de Cabacés, Tivissa y Masroig, se ha utilizado únicamente la serie de datos de Cornudella, asumiendo una distribución espacial uniforme en toda la cuenca vertiente al embalse.

9.1.2 Evapotranspiración

Para calcular la evapotranspiración real sobre la cuenca, debe realizarse primero una estimación de la evapotranspiración potencial, esto es, la capacidad de evapotranspiración máxima en caso de disponibilidad de agua ilimitada. Se asume que ésta depende solamente de las condiciones meteorológicas, principalmente radiación solar, temperatura del aire, humedad y velocidad del viento. Sin embargo, dado que la tipología de vegetación también influye en la tasa de evapotranspiración, ésta suele verse afectada por un coeficiente asignado en el módulo de cobertura vegetal.

Debe mencionarse que, si bien su conocimiento no es relevante cuando se trata de analizar la respuesta hidrológica de la cuenca frente a aguaceros de corta duración, en los casos de simulación continua puede ser más interesante para evaluar los cambios en las condiciones de humedad del suelo entre dos eventos de lluvia.

La evapotranspiración calculada en HMS está muy ligada a los procesos de interceptación en la cobertura vegetal y acumulación en superficie, que por consiguiente deben ser también modelados, especialmente tratándose de una simulación continua a largo plazo en la que la evapotranspiración del agua superficial consumirá buena parte del recurso a lo largo del tiempo. La evapotranspiración potencial actuará sobre los recursos disponibles en la cobertura vegetal, en el almacenamiento superficial y en la primera capa de suelo.

Existen en HEC-HMS distintos métodos para su simulación. En nuestro caso, se ha tomado el método de Priestley Taylor por requerir únicamente datos de temperatura, de los cuales se dispone.

9.1.2.1 Método de Priestley-Taylor

La ecuación principal del método es la siguiente (Taylor, 1972):

$$ET_o = \frac{C}{L_e \cdot \rho} \cdot \frac{\Delta}{\Delta + \Gamma} \cdot (R_n - G)$$

Dónde:

- ET_o es la Evapotranspiración Potencial;
- C es una constante adimensional llamada coeficiente de sequía;
- L_e es el calor latente de evaporación;
- ρ es la densidad del agua;
- Δ es la pendiente de la curva de presión de vapor – temperatura;
- Γ es la constante psicrométrica;
- R_n es la radiación neta;
- G es la pérdida de calor hacia el suelo.

Las operaciones son realizadas de manera interna. Los parámetros necesarios son el coeficiente de sequía y el histórico de temperaturas, así como el output de un modelo de radiación de onda corta. La pérdida de calor en el suelo G suele ser desestimada dada su irrelevancia. La radiación neta R_n es la diferencia entre la Radiación de onda corta incidente, y la radiación de onda larga reflejada. El valor recomendado para el coeficiente de sequía C para climas no áridos es 1.26 (Priestly & Taylor, 1972).

Los valores de radiación son extraídos a su vez a partir de un modelo de onda corta, para el cual se ha utilizado el método de Bristow Campbell. Éste simple metodo utiliza dos parámetros y la variación de temperatura mensual para estimar la radiación solar sobre el terreno. El principio es simple: grandes contrastes térmicos indican una variabilidad meteorológica importante, mientras que una temperatura más uniforme es interpretada como periodos sin gran variación en la radiación, esto es, nubosos. Esta hipótesis es entonces explotada para calcular la radiación de onda corta sobre el terreno a partir de datos muy simples.

En cuanto a los dos parámetros del método de Bristow Campbell, el valor de transmitancia, por defecto 0.7, representa la condición de máxima claridad celeste en la cuenca. El exponente controla el tiempo de máxima temperatura, y es dejado por defecto 2.4.

Como se ha comentado, se debe introducir el rango mensual de temperatura, esto es, la diferencia entre la máxima media mensual y la mínima media mensual. Para ello, previamente se estudiaron los datos de temperatura con el fin de establecer si pueden asumirse tendencias similares durante 24 años. Si observamos los gráficos de temperatura máxima y mínima diaria (Figura 39), no observamos patrones de cambio con la sucesión de los años:

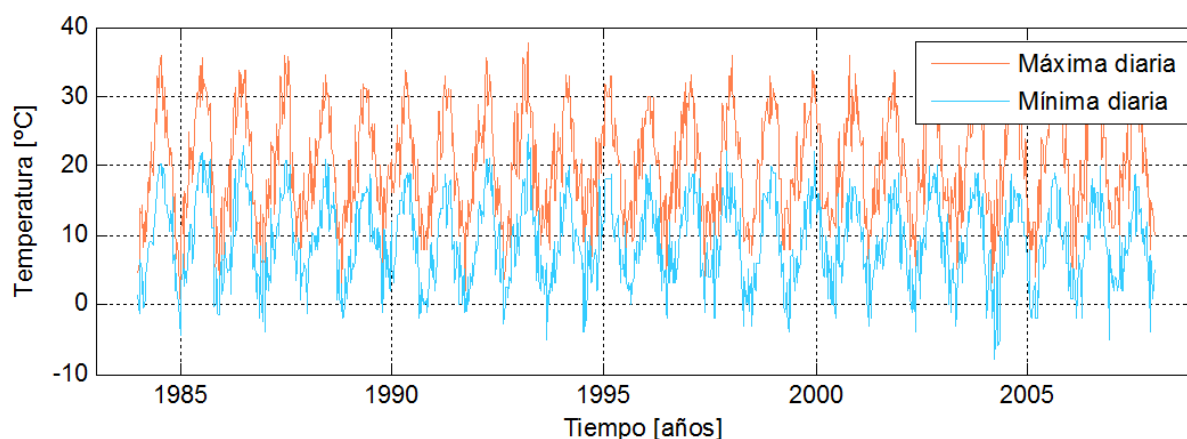


Figura 39: Temperaturas máxima y mínima diaria para el periodo 1984-2008.

Ello nos permite asumir un comportamiento estacional similar con independencia del año. Si clasificamos ahora las temperaturas por meses del año, observamos los siguientes patrones (Figura 40):

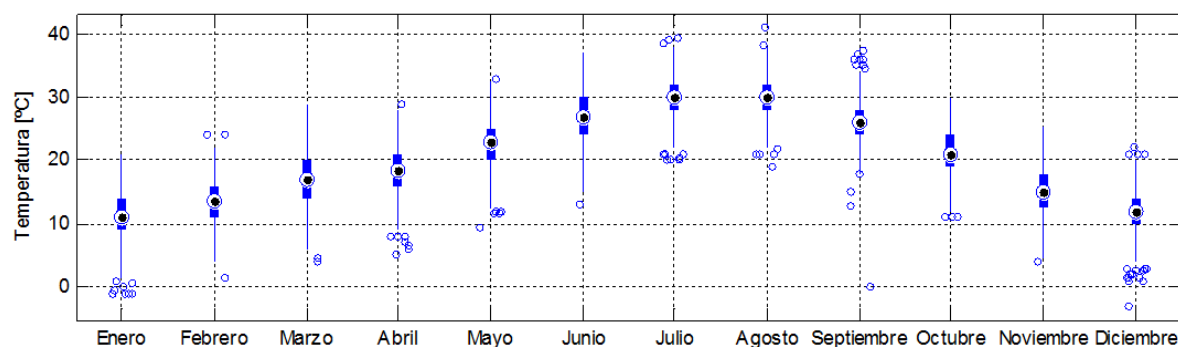


Figura 40: Boxplot de temperaturas máximas por meses, 1984-2008.

Efectivamente, los cuartiles 1 y 3 del Boxplot indican una alta concentración de los datos en una franja concreta de temperaturas por mes, pese a la presencia de outliers aislados. Tampoco se han observado diferencias significativas entre años húmedos y secos en cuanto a temperaturas, como se muestra en la Figura 41:

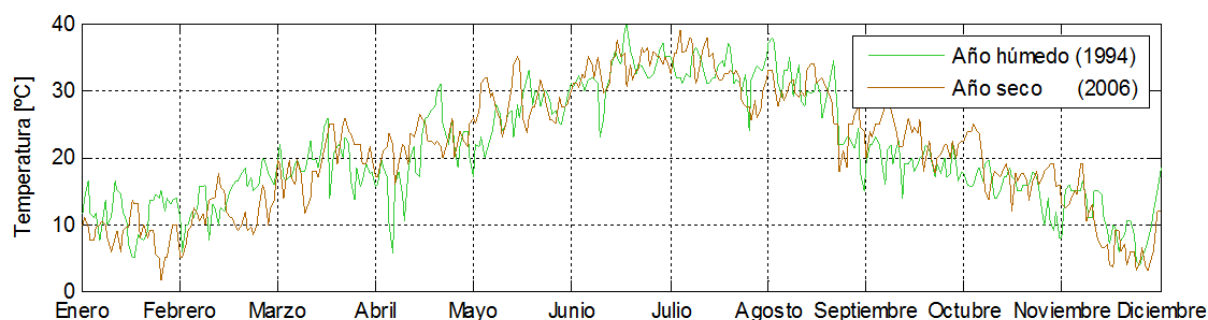


Figura 41: Comparativa de temperaturas para dos ejemplos de año húmedo y seco.

Se concluye asumible tomar la media mensual de los datos para obtener los rangos de temperatura. De este modo, se ha tomado la temperatura media máxima mensual y la temperatura media mínima mensual, la diferencia de las cuales constituye el valor de rango deseado (Tabla 13):

Tabla 13: Rango medio de temperatura mensual, 1984.2008.

	<i>Ene</i>	<i>Feb</i>	<i>Mar</i>	<i>Abr</i>	<i>Mayo</i>	<i>Jun</i>	<i>Jul</i>	<i>Ago</i>	<i>Sept</i>	<i>Oct</i>	<i>Nov</i>	<i>Dic</i>
Rango [°C]	8.4	10.1	11.3	11.5	12.1	12.8	13.5	12.9	11.9	10.2	8.9	8.2

Con estos valores es posible establecer definitivamente el modelo de evapotranspiración.

9.1.3 Intercepción-infiltración

Además de lo previamente mencionado, para determinar el volumen tanto de escorrentía superficial como subterránea que finalmente aportarán recurso hídrico al embalse, deben considerarse los procesos de infiltración al suelo, subsuelo y posteriormente al acuífero.

El programa HEC-HMS contempla diferentes alternativas a la hora de cuantificar esta repartición del agua:

- Establecimiento de un umbral de precipitación, por debajo del cual no se produce escorrentía superficial, y una tasa constante de pérdidas por encima del citado umbral;
- Utilización del concepto de número de curva (CN), desarrollado por el U.S. Soil Conservation Service (SCS), teniendo en cuenta los usos del suelo, el tipo de suelo y el contenido de humedad previo al episodio lluvioso que se considera;
- Método de Green y Ampt, que tiene en cuenta, entre otros, aspectos tales como la permeabilidad del suelo y el déficit inicial de humedad del mismo;
- Modelo SMA (Soil Moisture Accounting), que permite simular el movimiento del agua a través del suelo y del subsuelo, su intercepción y almacenamiento en diferentes zonas, y el escurrimiento superficial del exceso.

En cuanto a la aplicabilidad de estos modelos a las diferentes situaciones que se pueden plantear, cabe comenzar por señalar que el modelo SMA está especialmente indicado en los casos de simulación continua, mientras que los tres restantes se utilizan en los casos de aguaceros de corta duración, si bien el primero de los modelos mencionados también se puede utilizar en los casos de simulación continua.

En relación con los modelos concretos aquí mencionados, es interesante señalar que el método de Green y Ampt es de tipo distribuido; el modelo SMA y el modelo CN puede ser tanto de tipo agregado como distribuido; y el modelo basado en el establecimiento de un umbral de precipitación y una tasa constante de pérdidas es de tipo agregado.

Finalmente, cabe señalar que todos ellos son de tipo empírico, lo cual significa que los valores de los parámetros no pueden ser determinados a partir de mediciones específicas, sino que deben obtenerse mediante el oportuno proceso de calibrado o ajuste, o bien ser estimados a partir de las características de la cuenca.

A la hora de escoger qué procedimiento se utiliza para el módulo de infiltración, la primera de las exigencias es la necesidad de conocer la variación en períodos largos de tiempo, incluyendo tanto períodos lluviosos como otros de ausencia de precipitaciones. Traducida esta exigencia a la determinación del volumen de agua disponible para esorrentía, y teniendo en cuenta las diferentes posibilidades indicadas, la única alternativa válida que contempla el programa HEC-HMS es la utilización del modelo SMA, en su variante de modelo agregado, dado el escaso conocimiento que se tiene de las características del terreno a pequeña escala. Dada la importancia y complejidad que tiene el modelo SMA, se ha creído conveniente redactar una pequeña explicación de su funcionamiento, dado que su comprensión es de vital importancia para ser conscientes de las hipótesis asumidas así como los parámetros que deben calibrarse.

9.1.3.1 Modelo SMA

Dada la necesidad de conocer la variación que experimentan los caudales circulantes por el río en períodos largos de tiempo, resulta obligatorio utilizar el modelo SMA para representar las pérdidas de agua por infiltración y evapotranspiración como un modelo continuo de pérdidas. Se detallará a continuación el proceso de cálculo que se desarrolla en el citado modelo, el cual presenta secuencias de cálculo diferentes, según se trate de períodos lluviosos o de ausencia de precipitación.

El modelo SMA representa la cuenca mediante un conjunto de capas o depósitos, como se muestra esquemáticamente en la Figura 42, en la que se pueden ver también las conexiones o flujos de agua existentes entre los mismos.

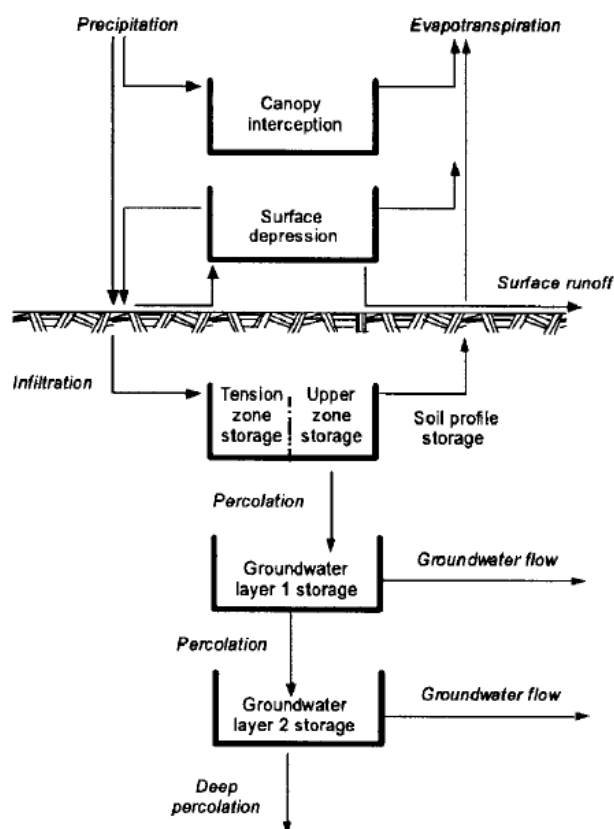


Figura 42: Esquema conceptual del modelo SMA. HEC (2000).

Los depósitos que intervienen son:

- El primero de los depósitos de almacenamiento que se muestran en la Figura 42 representa la parte de precipitación que es interceptada por la vegetación y no llega a alcanzar la superficie del terreno;
- El siguiente depósito representa el almacenamiento de agua en la superficie del terreno, en pequeñas depresiones;
- El primer depósito subterráneo trata de representar el fenómeno complejo de almacenamiento de agua en la capa superior del suelo, que está dividido, a su vez, en dos zonas:
 - La *upper zone*, que está constituida por la parte de suelo que es capaz de perder agua por evapotranspiración y percolación hacia el subsuelo por gravedad;
 - La *tension zone*, también llamada Capacidad de Campo, que representa la parte del suelo que pierde agua exclusivamente por evapotranspiración, esto es, la porción de agua que no percola por gravedad debido a la succión capilar de la corteza vegetal.
- Los dos depósitos subterráneos de almacenamiento de agua en el suelo, que se pueden reducir a uno solo según las circunstancias, sirven para representar el flujo base. La

consideración de uno o de los dos depósitos está condicionada por la forma de la curva de recesión del hidrograma correspondiente.

El modelo SMA calcula el flujo hacia, desde, o entre los depósitos de almacenamiento antes indicados, siendo muy importante resaltar que la secuencia del proceso de cálculo es diferente, según que se consideren períodos de precipitación o de ausencia de precipitación.

En eventos de precipitación

En los períodos en que existen precipitaciones, el primer destino del agua de lluvia es el depósito de intercepción por la vegetación, cuya máxima capacidad de almacenamiento está representada por el parámetro INTVEG, cuyo valor debe ser definido por el usuario. El exceso de precipitación sobre la citada capacidad de almacenamiento, unido al agua existente en el depósito de almacenamiento superficial al comienzo del intervalo de cálculo constituye el volumen de agua disponible para la infiltración en la capa superior del suelo.

El volumen infiltrado en la primera capa de suelo depende fundamentalmente del volumen de agua ya presente en el suelo, y de la cantidad de agua disponible para ser infiltrada. El volumen potencial de infiltración de agua (el máximo admisible) en el suelo durante un intervalo de tiempo Δt depende únicamente del grado de saturación del suelo. Esta dependencia se materializa numéricamente mediante una relación lineal que va desde una infiltración nula para un suelo completamente saturado, hasta una infiltración máxima en caso de un suelo totalmente seco. El volumen potencial se actualiza en cada paso de tiempo, y se determina mediante la expresión:

$$IP = MCIS \left(1 - \frac{AS}{CAS} \right) \cdot \Delta t$$

Siendo:

- IP: Potencial de infiltración en el suelo durante el intervalo Δt .
- MCIS: Máxima capacidad de infiltración de agua en el suelo, definida por el usuario.
- AS: Volumen de agua almacenado en el suelo al comienzo del intervalo de tiempo.
- CAS: Máxima capacidad de almacenamiento de agua en el suelo. Es un valor definido por el usuario.

Efectivamente, de la expresión anterior se deduce que si el depósito de almacenamiento de agua en el suelo se encuentra vacío, el potencial de infiltración iguala a la máxima capacidad de infiltración, mientras que si el citado depósito se encuentra lleno, el potencial de infiltración es nulo.

Para determinar el volumen de agua que realmente se infiltra en el suelo durante el mencionado Δt , hay que comparar el valor calculado de IP con el volumen total de agua

disponible para la infiltración al comienzo del intervalo. El mínimo de estos dos valores será el volumen de agua realmente infiltrado.

Si el volumen de agua disponible para la infiltración supera el valor de IP, el exceso de agua se incorpora al depósito de almacenamiento superficial. Cuando esta incorporación supera la capacidad del depósito de almacenamiento superficial (CADSUP), definida por el usuario, el exceso se convierte en escorrentía superficial.

Desde el depósito de almacenamiento de agua en el suelo se produce el fenómeno de percolación hacia el primero de los depósitos de agua subterránea considerados generalmente en el modelo SMA. Siguiendo una lógica similar al proceso de infiltración de la superficie al suelo, el volumen potencial de percolación entre ambos depósitos durante un Δt se determina mediante la expresión:

$$PP_1 = MCPS \cdot \left(\frac{AS}{CAS} \right) \cdot \left(1 - \frac{ADS_1}{CADS_1} \right) \cdot \Delta t$$

Siendo:

- PP_1 : Potencial de percolación hacia el primer depósito de agua subterránea;
- MCPS: Máxima capacidad de percolación desde el depósito de almacenamiento de agua en el suelo, definida por el usuario;
- ADS_1 : Volumen de agua almacenado en el primer depósito de agua subterránea al comienzo del intervalo de tiempo;
- $CADS_1$: Máxima capacidad de almacenamiento de agua en el primer depósito de agua subterránea. Es un parámetro definido por el usuario;
- AS, CAS: Ver notación indicada anteriormente.

De la expresión anterior se deduce que el potencial de percolación es tanto mayor cuanto más lleno se encuentra el depósito de almacenamiento de agua en el suelo y más vacío el primer depósito de agua subterránea, al comienzo del intervalo de tiempo, y viceversa.

Por otro lado, el volumen de agua disponible para la percolación es igual a la suma de la infiltración real desde la superficie y del volumen de agua existente al comienzo del intervalo en el depósito de almacenamiento de agua en el suelo. El mínimo resultante de la comparación entre este valor y el potencial de percolación antes calculado representa el volumen real de percolación que tiene lugar durante el correspondiente Δt hacia el primer depósito de agua subterránea.

De manera análoga se determina el potencial de percolación entre los dos depósitos de agua subterránea. Finalmente, existe una percolación al acuífero profundo que no aflorará en la cuenca estudiada, y cuya tasa de infiltración depende únicamente del grado de saturación del acuífero inferior.

En el caso de estudio se prevé el uso de un único acuífero subterráneo, por motivos tanto de tiempo de cómputo como de simplicidad del modelo. Debe recordarse la máxima seguida en el proyecto, que dice que un modelo debe ser tanto más simple cuanto mayor sea la escasez de datos, de modo que se minimice el número de parámetros a determinar.

En el caso de considerar un único depósito de agua subterránea, la percolación profunda se produce directamente desde el mismo, con un potencial de percolación (PP_2) dado por la siguiente expresión:

$$PP_2 = MCPDS_1 \left(\frac{ADS_1}{CADS_1} \right)$$

Durante cada intervalo de tiempo, se produce también otra salida de agua desde el primer y segundo depósito de agua subterránea, que contribuye a alimentar el caudal, en forma de flujo hipodérmico o flujo base, en el punto de desagüe de la cuenca considerada. El volumen (VDS_1) que representa dicha salida de agua para el primer depósito se determina mediante la expresión:

$$VDS_1 = \frac{1}{2} \cdot (Q_{1,t+\Delta t} + Q_{1,t}) \cdot \Delta t$$

Siendo $Q_{1,t}$ y $Q_{1,t+\Delta t}$ los caudales de salida de dicho depósito al principio y al final del intervalo de cálculo, respectivamente. El valor de $Q_{1,t+\Delta t}$ se determina, a su vez, a partir de la expresión:

$$Q_{1,t+\Delta t} = \frac{PR_1 + ADS_1 - PP_2 - \frac{1}{2} \cdot Q_{1,t} \cdot \Delta t}{TADS_1 + \frac{\Delta t}{2}}$$

Siendo PR_1 el volumen de percolación que tiene lugar, durante el intervalo de tiempo de cálculo, entre el suelo y el primer depósito de agua subterránea, y $TADS_1$ el coeficiente de almacenamiento del citado depósito subterráneo, que debe ser definido por el usuario. El significado del resto de las variables se ha indicado anteriormente.

La fórmula, que a primera vista puede parecer compleja, es un simple balance promediado en el paso de tiempo: la suma del agua entrante (PR_1) y existente (ADS_1), menos la saliente por infiltración (PP_2) y la mitad de la evacuada al inicio del paso ($Q_{1,t}$) es igual a la mitad de la evacuada al final del paso ($Q_{2,t}$). Promediando ambos valores de caudal y multiplicando por el intervalo de paso obtenemos VDS_1 , el volumen de salida por paso.

En ausencia de precipitación

En los períodos en que hay ausencia de precipitaciones, el proceso de cálculo presenta diferencias sustanciales en sus primeras fases respecto a lo anteriormente expuesto. Así, para empezar, el primero de los depósitos de almacenamiento de agua considerado en el modelo, que representa la intercepción por parte de la vegetación, no recibe ninguna entrada de agua,

como es lógico. No obstante, los procesos de evapotranspiración prosiguen su desarrollo, vaciando parcial o totalmente el agua retenida en la cobertura vegetal.

El depósito de almacenamiento superficial sufre también pérdidas continuadas tanto por evapotranspiración como la infiltración al suelo de acuerdo a la formulación previa. La diferencia radica en que, a la hora de calcular la infiltración real, la evapotranspiración tendrá preferencia sobre la infiltración, esto es, el agua almacenada se destinará en primer lugar a satisfacer la demanda de evapotranspiración potencial, y en caso que quedara un volumen sobrante, pasaría al cómputo de la infiltración. Dependiendo de las circunstancias, puede darse el caso de que el volumen de agua disponible para la infiltración sea nulo.

Si, además, la demanda de evapotranspiración potencial total no se puede satisfacer plenamente a partir del volumen de agua de la corteza vegetal y almacenamiento superficial, se procederá a la extracción del agua contenida en el subsuelo de la siguiente forma:

- En primer lugar, se intenta satisfacer a partir del volumen de agua contenido en la *upper zone*. En caso afirmativo, la evapotranspiración real será igual a la potencial, y el volumen de agua restante en el suelo continuará el mismo proceso que se ha descrito anteriormente, al hacer referencia a episodios lluviosos;
- Por el contrario, si la *upper zone* no satisface la ETP, se utilizará el agua contenida en la *tension zone* del citado depósito, en la que el agua se encuentra fuertemente ligada a las partículas del suelo, lo cual dificulta su extracción. La cantidad de agua evaporada desde la *tension zone* depende del volumen presente en ésta. La evapotranspiración real puede obtenerse a través del factor ETR/ETP, que depende del ratio entre el volumen presente en la *tension zone* y su capacidad máxima de almacenamiento. La función interna de HEC-HMS que describe estas relaciones se muestra en la Figura 43:

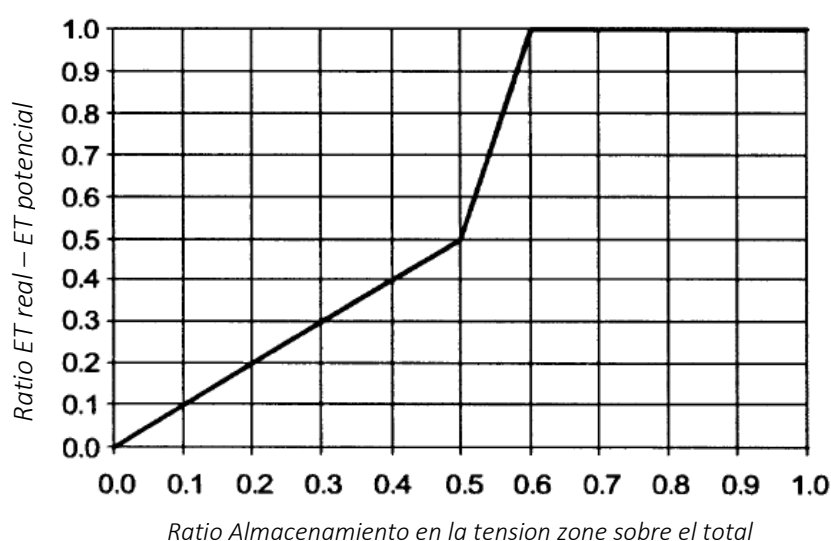


Figura 43: Curva de relación ETR-almacenamiento para la *tension zone*. HEC (2000).

El agua que queda en el depósito de almacenamiento de agua en el suelo, una vez satisfecha la demanda de evapotranspiración, está disponible para continuar su penetración en el terreno, alimentando sucesivamente los depósitos utilizados para representar el almacenamiento en capas más profundas. Los pasos que se siguen en este proceso son idénticos, incluidas las expresiones matemáticas, a los descritos al analizar los episodios lluviosos.

Entre los resultados proporcionados por el algoritmo del modelo SMA se encuentra, en primer lugar, el exceso de precipitación, cuya transformación en hidrograma de escorrentía superficial se realiza mediante un modelado posterior, independiente del modelo SMA. Por otro lado, se determina también el flujo subterráneo, cuya transformación en hidrograma se realiza también mediante un modelado externo posterior. También se proporciona la pérdida de recurso relativa a la percolación profunda.

9.1.3.1.1 Parámetros

A lo largo de la exposición del proceso de cálculo se ha hecho mención, en repetidas ocasiones, a variables cuyo valor debe ser definido por el usuario. En la Tabla 14 se presenta una relación resumida de todos ellos, incluyendo su código, su descripción y las unidades en que se miden.

Tabla 14: Parámetros del módulo SMA. HEC (2000).

Código	Descripción	Unidades
INTVEG	Capacidad máxima por intercepción	mm
CADSUP	Capacidad máxima superficial	mm
MCIS	Infiltración máxima de la superficie hacia el suelo	mm/h
CAS	Capacidad máxima del suelo	mm
CAZTS	Capacidad máxima de la <i>tension zone</i> del suelo	mm
MCPS	Percolación máxima del suelo hacia el subsuelo	mm/h
CADS ₁	Capacidad del depósito subterráneo	mm
MCPDS ₁	Percolación máxima del subsuelo hacia el acuífero	mm/h
TADS ₁	Coeficiente de almacenamiento del subsuelo	h
CIINTVEG	Contenido inicial de almacenamiento por intercepción	%
CIADSUP	Contenido inicial de almacenamiento superficial	%
CIAS	Contenido inicial del suelo	%
CIADS ₁	Contenido inicial del subsuelo	%

A continuación se presentan y justifican las aproximaciones iniciales tomadas para cada parámetro del modelo:

Cobertura vegetal:

- Contenido inicial de almacenamiento por intercepción: Se asume un valor bajo, que se estabilizará tras un número incierto de pasos de la simulación. Se toma un 1%.
- Almacenamiento máximo: se toma 1.3mm como aproximación inicial recomendada por Zinke (1967). El valor puede estar entorno a 2mm para hierbas, y hasta 2.5mm para árboles, con un umbral máximo estimado en 9mm.
- Crop coefficient: se trata de un valor de ajuste, que indica qué porcentaje de la ETP calculada en el módulo meteorológico realmente se aplica sobre la cobertura vegetal. Se asume que toda la ETP es efectiva, luego se toma un valor de 1.

Almacenamiento superficial:

- Contenido inicial de almacenamiento en depresiones de la superficie: Se asume un valor bajo, que se estabilizará tras un número incierto de pasos de la simulación. Se toma un 1%.
- Almacenamiento máximo: se tiene la siguiente tabla de recomendaciones por Chow (1962) y Dunne (1978)

Tabla 15: Estimaciones de almacenamiento superficial máximo. Chow (1962), Dunne (1978).

Contexto	Rango
Pavimentación impermeable	3,2 a 6,4 mm
Pendientes acusadas	1 mm
Pendientes moderadas	6,4 a 12,7 mm
Llanura, con surcos	50,8 mm

Se toma 5mm como intermedio entre pendientes acusadas y moderadas en una cuenca natural. Se toma como uniforme espacialmente, al no conocer la relevancia del parámetro. Tras el análisis de sensibilidad se juzgará la necesidad de distinguir el almacenamiento según el uso del suelo de cada cuenca.

Infiltración:

- Contenido inicial de almacenamiento del suelo: Se asume un valor bajo, que se estabilizará tras un número incierto de pasos de la simulación. Se toma un 1%.
- Tasa de infiltración superficial máxima: Se trata de la cantidad de agua capaz de infiltrar la superficie hacia el suelo por unidad de tiempo. Es difícil establecer con precisión el valor de infiltración de un suelo, ya que puede variar entre distintos órdenes de magnitud. En particular, Freeze (1979) indica un rango para arenas limosas de entre 0,1 mm/h y 1000 mm/h. Una buena estrategia es establecer un umbral inferior para éste

valor. Dado que la infiltración del suelo decrece a medida que éste satura, alcanzando la conductividad hidráulica saturada, ésta puede ser una buena aproximación inicial. Para un suelo estándar de composición distribuida entre arenas, limos y arcillas, Howard (1993) indica una conductividad de 22mm/h. Se espera por lo tanto que el valor una vez calibrado sea mayor.

- Capacidad de almacenamiento del suelo: Crawford (1966) sugiere que, para cuencas donde se produce escorrentía a partir de eventos moderados de lluvia, el agua retenida en el suelo puede estar en torno a 20mm.
- Capacidad de campo, profundidad de raíces o *tension zone*: se trata de la cantidad de agua que debe haber como mínimo en el suelo para producirse infiltración hacia la capa subterránea. Cantidades inferiores no se verán afectadas por la gravedad, y sólo se extraerán por evapotranspiración. Por definición, debe ser inferior o igual a la profundidad de la capa de suelo. McEnroe (2010) menciona que ésta puede ser considerada aproximadamente 0.4 veces la capacidad total del suelo, resultando en 8mm.
- Percolación al subsuelo: Similar al concepto anterior, se trata de la cantidad de agua capaz de infiltrar el suelo hacia las capas subterráneas por unidad de tiempo. Se asume un terreno homogéneo de iguales características, por lo que se toma 22 mm/h.
- Capacidad del subsuelo: ante el desconocimiento y la falta de datos relativos a las condiciones subterráneas del terreno, la capacidad deberá ser calibrada a posteriori. El agua que exceda este valor será considerada con infiltrada a la recarga profunda del acuífero, por lo que será extraída del modelo. Se ha propuesto un valor razonable de 5 veces la capacidad del suelo, 100mm.
- Tasa de infiltración profunda máxima: Las condiciones meteorológicas de la cuenca son de tipo seco. Por ello, la tasa de infiltración profunda puede ser ciertamente elevada en el momento en que exista agua en el subsuelo. Se toma el umbral máximo admisible, 500mm/h, a partir del cual se irá reduciendo durante la calibración.
- Coeficiente de almacenamiento K: se trata de la constante de proporcionalidad entre el volumen almacenado en el subsuelo y la salida correspondiente en un modelo de depósito lineal. Dado que no se puede conocer a priori porque se trata de una conceptualización del sistema subterráneo, se ha tomado como valor indicativo 1h para posteriormente calibrarlo.

9.1.3.1.2 Sensibilidad

El análisis se ha realizado variando cada parámetro de manera independiente y manteniendo los demás constantes. Para constatar su influencia, la variación se ha realizado simultáneamente en todas las subcuencas. Los resultados se resumen en la Tabla 16:

Tabla 16: Sensibilidad de los parámetros más relevantes previamente definidos sobre la infiltración.

Parámetro	Valor original	% de variación sobre el final acumulado			
		-20%	-10%	+10%	+20%
Almacenamiento en cobertura	1.3 mm	0.04%	0.02%	-0.02%	-0.05%
Almacenamiento en superficie	5 mm	0%	0%	0%	0%
Infiltración máxima al suelo	22 mm/h	0%	0%	0%	0%
Capacidad del suelo	20 mm	0%	0%	0%	0%
Capacidad de campo	8 mm	0.11%	0.05%	-0.05%	-0.11%
Percolación al subsuelo	22 mm/h	0%	0%	0%	0%
Capacidad del subsuelo	100 mm	-51.78%	-27.43%	26.52%	52.17%
Infiltración profunda	500 mm/h	64.68%	29.41%	-	-
Coeficiente de almacenamiento	1 h	64.58%	29.35%	-24.83%	-46.31%

Del presente análisis de sensibilidad se desprende que los parámetros más influyentes son la capacidad del subsuelo, la tasa de infiltración profunda, y el coeficiente de almacenamiento. De éstos, se debe prestar especial atención al coeficiente de almacenamiento, tanto por ser el parámetro principalmente más influyente, como por el hecho de que se trata de un valor conceptual, sin sentido físico, el cual debe ser estimado directamente a partir de su calibración empírica.

Quedan así definidos los parámetros, aproximaciones iniciales y objetivos a calibrar en cuanto al módulo de infiltración SMA.

9.1.4 Escorrentía superficial

Otro de los aspectos que es susceptible de ser analizado de manera individualizada es el referente al desarrollo de la escorrentía superficial y su concentración en un determinado punto del cauce. El programa HEC-HMS contempla dos posibles alternativas, basadas en modelos de tipo empírico o conceptual, respectivamente.

Los modelos de tipo empírico están basados en mayor o menor medida en el concepto del hidrograma unitario, propuesto originalmente por Sherman en 1932. El programa permite seleccionar uno de los siguientes:

- Hidrograma unitario definido por el usuario;
- Hidrograma sintético de Snyder;

- Hidrograma del Soil Conservation Service;
- Hidrograma de Clark (original y modificado).

Todos ellos son de tipo empírico, y son aplicables, en principio, a aguaceros de corta duración, si bien su formulación no impide utilizarlos en casos de simulación continua, considerados como una sucesión de aguaceros. Por otro lado, todos ellos, salvo el hidrograma de Clark modificado, son de tipo agregado.

Como alternativa a los modelos anteriores, el programa HEC-HMS incluye un modelo conceptual, de tipo onda cinemática, en el que la cuenca o subcuenca está representada por un cauce muy ancho, alimentado en su origen por el exceso de precipitación. Este modelo es de tipo agregado y se aplica al caso de aguaceros de corta duración. Los datos necesarios para su utilización, que deben ser extraídos de medidas reales, hacen referencia a la longitud, pendiente, rugosidad de la cuenca, etc.

Dado el sustancial precedente que tiene en el ámbito de modelación hidrológica, junto con su simplicidad de parámetros a calibrar, se ha optado por el modelo de Clark agregado, del que a continuación se describen sus principales características. La elección de este modelo no ha sido condicionada por la utilización previa del modelo SMA, y está justificada básicamente por el tipo de estudio a realizar y la cantidad y calidad de la información disponible en relación con las cuencas en cuestión.

9.1.4.1 *Modelo de Hidrograma Unitario de Clark*

El modelo de Clark considera que en el proceso de transformación del exceso de precipitación sobre una cuenca en hidrograma en el punto de desagüe intervienen dos tipos de fenómenos:

a) Traslación del exceso de agua:

El modelo de Clark tiene en cuenta el tiempo que tarda el agua en alcanzar el citado punto de desagüe de la cuenca. Esto se suele definir teniendo en cuenta la distancia de cada elemento de área con respecto al punto de vertido. De este modo puede obtenerse una curva que indique, para cada instante de tiempo, el área que ha aportado agua al punto de vertido desde el inicio.

Para ello debe introducirse el concepto de Tiempo de Concentración (T_c). Se define como el tiempo mínimo necesario para que todos los puntos de una cuenca estén aportando agua de escorrentía de forma simultánea al punto de salida, punto de desagüe o punto de cierre. Está determinado por el tiempo que tarda en llegar a la salida de la cuenca el agua que procede del punto hidrológicamente más alejado, y representa el momento a partir del cual el caudal de escorrentía es constante, al tiempo que máximo; el punto hidrológicamente más alejado es aquél desde el que el agua de escorrentía emplea más tiempo en llegar a la salida. Es un parámetro característico de cada cuenca y depende de los siguientes factores:

- Tamaño de la cuenca: a mayor tamaño mayor T_c ;
- Topografía de la cuenca: a mayor accidentalidad o pendiente, menor T_c ;
- Forma de la cuenca: a igualdad de otros factores, las cuencas alargadas presentan menores T_c que las cuencas apaisadas o redondeadas.

Las metodologías para obtener la relación de tiempo-área son dos:

- La primera consiste en realizar un análisis de isócronas donde el T_c es constante durante todos los eventos que se presenten, y la relación tiempo-área toma las áreas reales entre cada intervalo del tiempo de concentración. Para ello debe tenerse una serie de pluviometría en intervalos del orden de minutos.
- La segunda metodología emplea una curva sintética de tiempo-área (ver Figura 44), la cual permite obtener una relación de áreas entre cada intervalo del tiempo de concentración mediante fórmulas predefinidas y generalizadas. .

Debe apuntarse que, en la realidad, los tiempos de concentración para cada evento no son constantes, sino que cambian dependiendo el evento en función de la velocidad de propagación del agua, que a su vez dependerá de los caudales, calados, pendientes motrices y rugosidades instantáneas.

Ante la imposibilidad de obtener empíricamente las curvas reales área-tiempo a partir de datos de lluvia promediados diariamente, para el presente trabajo se empleará la segunda metodología, que será debidamente calibrada con el registro de datos disponibles.

La versión de Clark utiliza un histograma típico área-tiempo definido en la forma siguiente:

$$\left[\begin{array}{ll} \frac{A_t}{A} = 1.414 \cdot \left(\frac{t}{T_c} \right)^{1.5} & \text{si } t \leq \frac{T_c}{2} \\ \frac{A_t}{A} = 1 - 1.414 \cdot \left(\frac{t}{T_c} \right)^{1.5} & \text{si } t > \frac{T_c}{2} \end{array} \right.$$

Designando A_t el área acumulada de la cuenca que contribuye al caudal desaguado en el instante t , A el área total de la cuenca, y T_c el tiempo de concentración de la misma.

En la Figura 44 se observa la cuenca sintética que utiliza el método, el análisis del tiempo de concentración normalizado y la curva sintética tiempo-área, determinados mediante el hidrograma unitario de Clark (Hoggan, 1997).

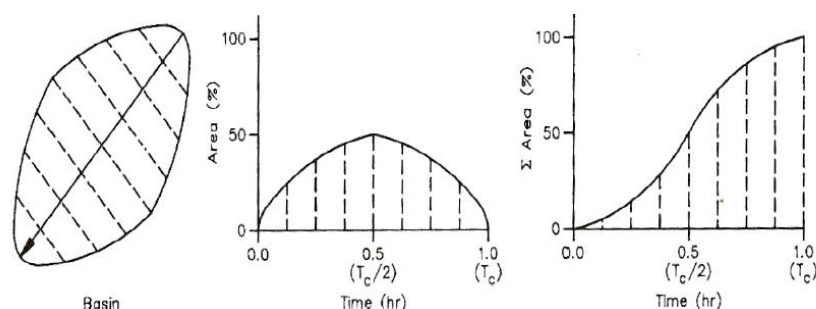


Figura 44: Izquierda: Forma de la cuenca generalizada. Centro: forma generalizada del T_c . Derecha: relación normalizada tiempo-área. Hoggan (1997).

Esta curva se puede aplicar a la mayoría de las cuencas; sin embargo, para una cuenca que se desvíe sustancialmente de la forma generalizada, es necesario realizar una curva de tiempo-área específica para esa cuenca o se puede emplear otra generalización de otro método.

b) Laminación del caudal punta del hidrograma

Este almacenamiento temporal, que tiene lugar en el suelo, en la superficie del terreno y en los cauces, juega un papel importante en la transformación del exceso de precipitación en escorrentía. Uno de los procedimientos habitualmente empleados para representarlo es la utilización de un modelo de depósito lineal.

Un modelo de depósito lineal consiste en la conceptualización del sistema en un depósito donde se produce una entrada y una salida del agua, que a su vez dependerá del valor de entrada y del agua almacenada debido al incremento del nivel del embalse. Siguiendo la notación habitual, el citado modelo parte de la ecuación de continuidad, expresada en la forma:

$$\frac{dS}{dt} = I(t) - O(t)$$

Dónde:

- $\frac{dS}{dt}$: Variación temporal del volumen de almacenado en el mencionado depósito lineal;
- $I(t)$: Caudal entrante en el instante t ;
- $O(t)$: Caudal saliente en el instante t .

La particularidad consiste en que el caudal de salida del agua se asume directamente proporcional al volumen almacenado. Es evidente que es muy difícil que se dé exactamente esta condición en un depósito, pero debe recordarse que se trata de una conceptualización, donde el depósito en sí tampoco tiene un sentido físico.

Admitiendo la hipótesis de depósito lineal, el almacenamiento en el instante t , $S(t)$, se relaciona con el caudal saliente en dicho instante mediante la expresión:

$$S(t) = K \cdot O(t)$$

Donde K , coeficiente de almacenamiento, es un parámetro de valor constante que caracteriza al mencionado depósito y que, en último término, debe ser definido por el usuario, aunque puede extraerse del análisis de un hidrograma suficientemente detallado.

Combinando las ecuaciones anteriores y resolviendo el sistema a través de un método de diferencias finitas, se llega a:

$$O(t) = C_a \cdot I(t) + (1 - C_a) \cdot O(t - \Delta t)$$

En donde C_a es un coeficiente cuyo factor se determina a partir de la expresión:

$$C_a = \frac{\Delta t}{K + \frac{\Delta t}{2}}$$

Siendo Δt el incremento de tiempo de cálculo. Por otro lado, el caudal medio desaguado durante el citado incremento de tiempo se define como

$$O(t)_m = \frac{O(t - \Delta t) + O(t)}{2}$$

Resolviendo las ecuaciones de manera recurrente se obtienen los valores $O(t)_m$ para cada paso de tiempo, variable considerada como el caudal resultante a la salida del depósito lineal.

9.1.4.1.1 Parámetros

La metodología considerada para evaluar la escorrentía superficial es el Hidrograma Unitario de Clark, como se ha descrito antes. Ésta consiste en una traslación del agua desde el punto en que se origina hasta el punto de desagüe de la cuenca, y una laminación debido al almacenamiento transitorio del agua en el conjunto de la cuenca. El primer proceso se caracteriza mediante el Tiempo de Concentración (T_c), y el segundo, mediante el Coeficiente de Almacenamiento (K), un índice del almacenamiento temporal de la precipitación excedente en el interior de la cuenca, que drena hacia el punto de desagüe de la misma.

- Tiempo de Concentración:

Existe una gran cantidad de formulaciones desarrolladas desde hace décadas para todo tipo de cuencas. Éstas van desde expresiones muy simples hasta complejos ajustes sólo válidos para la cuenca en que fue desarrollada. Para el presente trabajo, se ha realizado una búsqueda exhaustiva de métodos de cálculo del Tiempo de Concentración, y se han seleccionado aquellas formulaciones que resulten apropiadas para el ámbito de estudio, esto es: pequeñas cuencas, de morfología natural, y de expresión simple dado el notable grado de desconocimiento del terreno. Finalmente, se han seleccionado las metodologías presentadas en la Tabla 17, cuyos parámetros de dependencia son únicamente la longitud del cauce L [km], su pendiente media S [%] y el área de la cuenca A [km²].

Tabla 17: Metodologías consideradas para la obtención del Tiempo de Concentración.

<i>Método</i>	<i>Fórmula</i>	<i>Observaciones</i>
Kirpich [h]	$T_c = 0.066 \left(\frac{L}{S^{0.5}} \right)^{0.77}$	Ajustado a 7 pequeñas cuencas montañosas de Tennessee. Kirpich recomienda su aplicación sólo en áreas rurales de área 0.004 a 0.8094 km ² , con pendientes acusadas del 3-10%. Kirpich (1940), Fang et al. (2008).
Clark [h]	$T_c = 0.335 \cdot \left(\frac{A}{S^{0.5}} \right)^{0.593}$	Presentado en su paper sobre el propio Hidrograma Unitario de Clark, y aplicado a cauces naturales de Virginia y Carolina del Norte. Clark (1945).
Témez [h]	$T_c = 0.3 \left(\frac{L}{S^{0.25}} \right)^{0.75}$	Ajustado a cuencas naturales españolas por Témez (1978). La metodología se adapta a cuencas de áreas hasta 3000km ² . Mata-Lima et al. (2007).
Bransby-Williams [h]	$T_c = \frac{L}{1.5 \cdot \left(\frac{4 \cdot A}{\pi} \right)^{\frac{1}{2}}} \cdot \sqrt[5]{\frac{A^2}{S}}$	Especialmente recomendado para cuencas rurales o bien naturales. Ministry of Transportation and Highways (MOTH) (1998), Alaska highway drainage manual (ASDOT) (1995).
Pasini [h]	$T_c = \frac{L}{\sqrt{S}} \cdot \frac{(S \cdot L)^{1/3}}{i^{0.5}}$	Proveniente de datos de cuencas rurales en Italia por Pasini (1914), Greppi (2005).

A continuación se muestran los resultados de implementar las 5 formulaciones planteadas para cada una de las 16 subcuencas que conforman el área de estudio:

Tabla 18: Tiempos de concentración por cuenca según las formulaciones empíricas presentadas.

Subcuenca:	W180	W190	W200	W210	W220	W230	W240	W250	W260	W270	W280	W290	W300	W310	W320	W330
Variables:																
Pendiente media [%]	8.20	8.09	10.60	12.30	7.40	8.10	2.70	13.50	4.70	11.40	18.50	17.40	5.40	8.50	5.40	2.70
Superficie [km ²]	5.74	2.24	6.09	2.05	3.83	1.78	3.16	2.49	9.00	1.83	0.94	1.26	6.48	4.15	8.15	0.78
Longitud del cauce [km]	5.61	2.84	5.15	2.92	4.19	3.24	3.84	3.00	7.20	3.25	1.97	1.95	5.70	6.64	6.67	1.94
Tiempo de Concentración:																
Kirpich [h]	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2	0.1	0.0	0.0	0.1	0.1	0.1	0.1
Clark [h]	0.5	0.3	0.5	0.2	0.4	0.3	0.5	0.3	0.8	0.2	0.1	0.2	0.6	0.4	0.7	0.2
Temez [h]	0.7	0.4	0.7	0.4	0.6	0.5	0.7	0.4	1.0	0.5	0.3	0.3	0.8	0.8	0.9	0.4
Bransby-Williams [h]	1.8	1.0	1.6	1.0	1.5	1.2	1.7	1.0	2.5	1.1	0.7	0.6	2.0	2.2	2.3	1.0
Pasini [h]	2.6	1.2	2.0	1.1	2.0	1.5	3.0	1.0	4.4	1.3	0.6	0.6	3.2	3.4	3.8	1.5
Promedio [h]	1.42	0.75	1.19	0.67	1.11	0.87	1.47	0.66	2.18	0.77	0.42	0.41	1.66	1.71	1.93	0.78
Desv. Est. Rel [%]	0.53	0.47	0.48	0.46	0.51	0.53	0.61	0.44	0.60	0.51	0.46	0.42	0.56	0.61	0.58	0.59

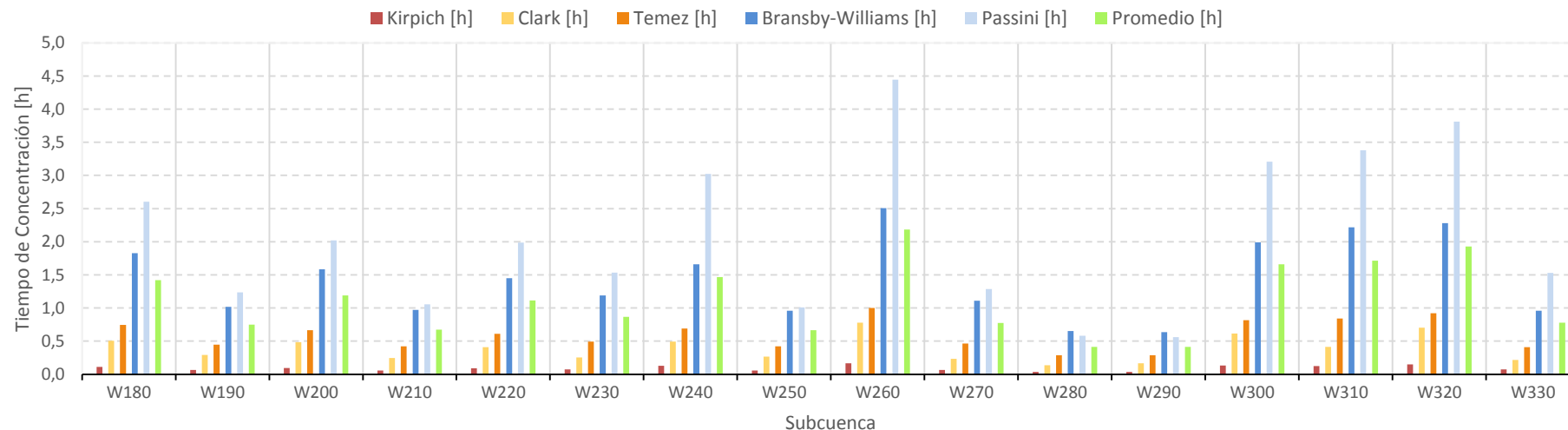


Figura 45: Tiempos de concentración por cuenca. Comparativa gráfica.

De la Tabla 18 y la Figura 45 se desprende una significativa diferencia entre métodos, siendo la desviación estándar relativa del orden del 50%. Esta cuestión es un tema recurrente en el ámbito de la hidrología superficial, donde algunos autores estiman necesaria una monitorización intensa y regular para escoger la metodología adecuada a cada cuenca en cuestión (Almeida, I. et Al., 2015).

Sin embargo, se pueden observar tendencias distintas en función de la subcuenca que servirán de base para la posterior calibración. En particular, las formulaciones de Témez y Clark son especialmente similares, lo cual arroja confianza sobre los resultados. Se ha observado también una diferencia significativa del método de Kirpich con respecto al resto, ofreciendo valores especialmente bajos y no confiables. Debe recordarse que Kirpich (1940) recomienda su aplicación sólo en cuencas de área 0.004 a 0.8094 km², valores sustancialmente inferiores a los de las subcuencas de estudio, por lo que finalmente se han desestimado. Así, se ha tomado como aproximación inicial el promedio de los resultados restantes.

- Coeficiente de almacenamiento:

Ante la imposibilidad de determinar experimentalmente el coeficiente de almacenamiento, dado que recordemos que se trata de una conceptualización, múltiples autores han expresado su criterio para la obtención del parámetro:

- El Hydrology Engineering Center (1967) sugiere que el coeficiente K es igual a 0.8 veces el tiempo de concentración;
- Rusell et al. (1979) lo asocian a un factor entre 1.5 y 2.8 veces T_c;
- Según Domínguez et al. (2008), el factor puede llegar a ser 0.16;
- En la universidad de Salamanca se enseña un factor 0.75;
- Magaña-Hernández et al. (2013) toman como primera aproximación 0.5 veces T_c.

Sin embargo, todos coinciden en que, al tratarse de un parámetro conceptual y no físico, siempre requerirá calibración. A la vista de las discrepancias y ante la necesidad de una calibración posterior, se ha tomado un valor igual al tiempo de concentración en cada cuenca particular.

Tras el ajuste de los parámetros, se presentan a continuación los hidrogramas unitarios de Clark correspondientes a cada una de las 16 cuencas de estudio:

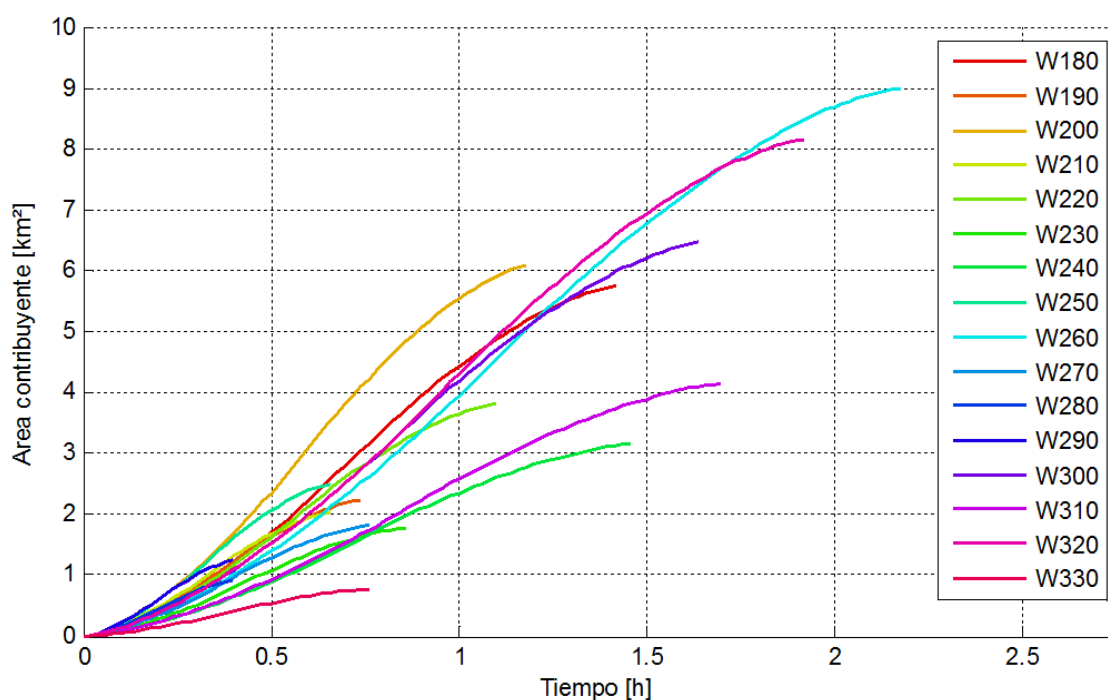


Figura 46: Curva de relación área tiempo para las 16 subcuencas del ámbito de estudio para el embalse de Siurana, en base al hidrograma unitario sintético de Clark.

9.1.4.1.2 Sensibilidad

Según el procedimiento anteriormente descrito, se ha evaluado la sensibilidad de los resultados del modelo con respecto a los parámetros relacionados con la escorrentía superficial (Tabla 19). La variación se ha medido sobre el volumen final acumulado en el embalse de Siurana:

Tabla 19: Análisis de sensibilidad de los parámetros previamente definidos para la escorrentía superficial.

Parámetro	Valor original	% de variación sobre el final acumulado			
		-20%	-10%	+10%	+20%
Tiempo de Concentración	[varios]	0%	0%	0%	0%
Coefficiente de almacenamiento	[varios]	0%	0%	0%	0%

No se observaron variaciones significantes en el análisis de sensibilidad sobre el modelo de escorrentía superficial. La larga extensión temporal hace irrelevantes los errores que pudiera haber en el ajuste del hidrograma unitario de Clark, además de que sus valores se ven condicionados al paso de tiempo utilizado. El pequeño retardo que supone el tránsito de la escorrentía no influye en el volumen final a largo plazo.

9.1.5 Flujo base

Tiene su origen en la precipitación registrada sobre la cuenca en períodos precedentes, que se ha almacenado temporalmente en capas más o menos profundas, e incluye también el flujo

hipodérmico o subsuperficial asociado al período actual. El programa HEC-HMS considera cuatro posibles alternativas para su modelación:

- Caudal constante, con posible variación mensual. Aunque puede parecer excesivamente simplista, resulta válido cuando se trata de determinar el caudal máximo de un hidrograma aislado. También es útil en caso de simulación continua si son conocidos los caudales base mensuales previamente;
- Curva de recesión exponencial: ofrece un caudal exponencialmente decreciente de uno o más episodios secuenciales;
- Depósitos lineales sucesivos: parten de la masa de agua infiltrada en el módulo SMA mediante una propagación retardada a través de depósitos lineales. Es el único en el cual no se generan nuevos volúmenes de agua;
- Método no lineal de Boussinesq: ofrece respuestas similares al modelo de recesión, pero con la diferencia de que los parámetros pueden ser estimados a partir de mediciones en la cuenca hidrológica.

Todos estos modelos son agregados, empíricos y aplicables, en principio, a aguaceros aislados, de corta duración. Sin embargo, los más recomendados para simulación continua son los depósitos lineales y el modelo de caudales constantes. En el caso del presente proyecto se ha tomado el modelo de depósitos lineales por dos motivos:

- No se conocen a priori los caudales base mensuales;
- El modelo de depósito es señaladamente apropiado para su uso conjunto con el módulo SMA, que ofrece los valores de escorrentía subterránea previamente calculados para introducirlos en los modelos de depósito lineal.
- Es el único modelo que toma el volumen de agua proveniente de la precipitación asignada una vez infiltrada, de modo que no se añaden volúmenes ficticios de agua.

9.1.5.1 *Modelo de depósitos lineales*

Ya se ha descrito en el apartado 9.1.4: *Escorrentía Superficial* cómo el Método de Hidrograma Unitario de Clark utiliza la hipótesis de depósitos lineales para atenuar el flujo superficial. Del mismo modo se pretende atenuar el flujo subterráneo, a través de una serie de depósitos lineales sucesivos. Al tratarse de flujo subterráneo, la atenuación será siempre mucho mayor, por lo que puede ser necesario conectar múltiples depósitos lineales en serie hasta obtener la laminación correspondiente a los datos observados.

Cada uno de los mencionados depósitos lineales tiene un comportamiento análogo al descrito en el apartado anterior, desde el punto de vista matemático. Todos ellos tienen un mismo valor del coeficiente de almacenamiento, que es uno de los parámetros del modelo que debe definir el usuario. El otro parámetro es el número de depósitos conectados en serie.

Hay que precisar que este modelo de depósitos lineales en serie se aplica tanto al volumen desaguado por el primero de los depósitos de agua subterránea definidos en el modelo SMA como al desaguado por el segundo de dichos depósitos, en caso de que se considere. En general, se establecen dos modelos de depósitos lineales independientes, cuyos parámetros pueden tener valores diferentes en uno y otro caso. En el caso particular del presente proyecto, por motivos de simplicidad sólo se considerará un sistema de depósitos lineales correspondientes a la primera capa de subsuelo.

El caudal de salida final constituye el hidrograma del flujo base, que se suma al resultante de la aplicación del modelo de Clark para dar lugar al hidrograma global en el punto de desagüe de la cuenca.

Llegados a este punto, habremos conseguido agrupar toda el agua producida por la lluvia neta - no perdida en el proceso- en el punto de vertido de la cuenca, con su correspondiente desfase y laminación. Esta operación debe realizarse para todas las subcuencas que conforman la cuenca global objeto de estudio, para posteriormente conectarse entre sí y permitir la adición de todos los hidrogramas en un único hidrograma de aportación final al embalse.

9.1.5.1.1 Parámetros

El caudal de aportación subterránea a la salida de la cuenca debe caracterizarse mediante su condición inicial, y el coeficiente de almacenamiento K correspondiente a un hipotético doble depósito lineal que simularía el comportamiento del subsuelo.

- Como condición inicial se ha tomado el valor cero, ya que es sabido que los primeros meses de simulación sirven para tomar la inercia del modelo y no deben ser considerados sus resultados.
- Dado que K no se puede conocer a priori porque se trata de una conceptualización del sistema subterráneo, se ha tomado como valor indicativo 1h para posteriormente calibrarlo. Se conoce, sin embargo, que el valor final será mucho mayor por tratarse de un proceso de flujo en el subsuelo.

9.1.5.1.2 Sensibilidad

A continuación (Tabla 20) se muestra el análisis de sensibilidad realizado sobre el coeficiente de almacenamiento del flujo base:

Tabla 20: Sensibilidad de los parámetros más relevantes previamente definidos para el flujo base

Parámetro	Valor original	% de variación sobre el final acumulado			
		-20%	-10%	+10%	+20%
Coficiente de almacenamiento	1h	0%	0%	0%	0%

De nuevo, la gran ventana temporal junto con el paso de tiempo utilizado hace pensar sobre la irrelevancia de la calibración de este parámetro. Sin embargo, durante la calibración se vio que el parámetro, si bien no afecta al volumen final embalsado, afecta a la forma del hidrograma de entrada al embalse, por lo que se ajustó de modo que asemejara al máximo las observaciones reales. Su ajuste pues no aporta valiosa información sobre el modelo en términos de recursos hídricos, pero le confiere un comportamiento más realista paso a paso.

9.1.6 Tránsito del hidrograma

Una vez caracterizado el hidrograma a la salida de una subcuenca, éste debe introducirse en el tramo de cauce que conecta ésta con sus vecinas aguas abajo. El discurrir de estos caudales hacia aguas abajo, a lo largo de un determinado tramo de cauce, da lugar a un nuevo hidrograma en el extremo de aguas abajo del mismo. El programa HEC-HMS permite escoger entre los siguientes modelos a la hora de tratar de representar la transformación que experimenta el hidrograma entre los puntos inicial y final de un tramo de cauce:

- Modelo Lag;
- Modelo de Puls modificado;
- Modelo de Muskingum;
- Modelo de Muskingum-Cunge;
- Modelo de onda cinemática;
- Modelo de Straddle Stagger.

La exposición detallada de cada uno de estos modelos excede lo que aquí se pretende. No obstante, cabe señalar que todos ellos son de tipo agregado, y aplicables, en principio, a aguaceros aislados de corta duración. En cuanto a sus fundamentos básicos, hay que indicar que el modelo de onda cinemática es de tipo conceptual, mientras que el modelo Lag, el de Puls modificado, el de Muskingum y Straddle Stagger son de tipo empírico. El modelo de Muskingum-Cunge es de tipo cuasi-conceptual, ya que en su formulación intervienen algunas variables que son susceptibles de ser determinadas a partir de mediciones geométricas (canales trapezoidales, triangulares o circulares, y zonas de desbordamiento). El método de Puls modificado puede utilizarse para modelar el curso del río a través de cascadas y piscinas (modelo de depósito) con una relación almacenamiento-descarga especificada por el usuario.

9.1.6.1 Modelo Lag

Entre las diferentes posibilidades que contempla el programa HEC-HMS para representar el tránsito de hidrogramas a lo largo de tramos de cauce, la más simple es la constituida por el modelo Lag.

En dicho modelo, el hidrograma correspondiente al extremo de aguas abajo de un determinado tramo de cauce es idéntico al registrado en el extremo de aguas arriba del mismo, con la única

salvedad de que se produce con un cierto retraso temporal. La forma del hidrograma no experimenta variación, es decir, no se produce ninguna laminación en el cauce.

El único parámetro que interviene en la definición del modelo es el denominado tiempo de retardo, y debe ser establecido por el usuario. Su valor depende, entre otros factores, de la longitud de tramo considerado, de la pendiente y de la rugosidad del cauce, que son características físicas. También depende del caudal circulante: Un aumento del caudal circulante lleva aparejado un aumento del calado y un consiguiente aumento de velocidad del flujo, lo que da lugar a una disminución del tiempo de recorrido. Sin embargo, si se produce el desbordamiento del cauce menor, disminuye la velocidad media, lo cual se traduce en un ligero aumento del tiempo de recorrido, que vuelve a disminuir después, al continuar aumentando el calado (Ponce, 1989).

En la Figura 47 se muestra el resultado de aplicar el modelo Lag a un determinado hidrograma.

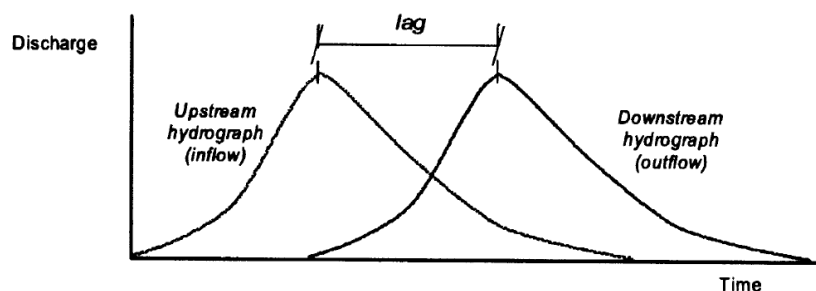


Figura 47: Explicación gráfica del modelo Lag. HEC (2000).

Este modelo, a pesar de su indudable simplicidad, no está exento de aplicación práctica. Así, resulta aplicable en aquellos casos en los que la longitud del tramo de cauce entre dos puntos de cálculo es muy pequeña, o bien cuando la ventana temporal es tan grande que la posible laminación ya está incluida en el resto de procesos anteriores y posteriores. En nuestro caso, el posible retardo asociado podría ser convenientemente menospreciado dada la extensa ventana temporal de trabajo. Sin embargo, por completitud se ha incluido en la modelación.

9.1.6.2 Parámetros

Como se ha dicho en la descripción de los procesos, el modelo Lag sólo requiere del tiempo de retardo del hidrograma en su paso por el canal que conecta las cuencas. Si se tratase de simular el comportamiento de la cuenca ante un aguacero aislado, se podría estimar el valor adecuado del tiempo de recorrido, que correspondería a un valor intermedio del caudal, dentro del rango de valores incluidos en el hidrograma.

Ahora bien, en el caso de realizar una simulación continua, la solución no es tan sencilla, ya que en el período de tiempo considerado se desarrollarán, en principio, muchos hidrogramas, con características diferentes.

La aproximación inicial escogida consiste en asumir que el tiempo de concentración de la cuenca previamente calculado es indicativo de la velocidad media del flujo en la cuenca, y aplicar esa velocidad a la longitud del cauce de transporte. De este modo resulta lo siguiente:

Tabla 21: Tiempos de retardo asociados a los cauces de tránsito.

Tramo de cauce	R40	R70	R80	R110	R130	R150	R170
Cuenca de tránsito	W210	W250	W280	W290	W240	W330	W300
Longitud [km]	1.43	2.11	0.97	1.30	3.16	0.59	4.97
Velocidad [km/h]	4.34	4.51	4.75	4.72	2.62	2.48	3.44
Tiempo de Retardo [h]	0.33	0.47	0.20	0.28	1.21	0.24	1.45

Debe tenerse en cuenta que, tanto en los datos como en los resultados, se consideran los valores medios diarios y que el interés no se centra en la simulación precisa de los hidrogramas sino en la representación de todas las aportaciones, predominando caudales bajos en períodos de estiaje, por lo que se espera que el parámetro no sea de gran influencia.

9.1.6.3 Sensibilidad

El análisis de sensibilidad realizado sobre el módulo de tránsito del hidrograma a través de los cauces se resume en la Tabla 22:

Tabla 22: Sensibilidad de los parámetros más relevantes para el tránsito del hidrograma.

Parámetro	Valor original	% de variación sobre el final acumulado			
		-20%	-10%	+10%	+20%
Tiempo de Retardo	[varios]	0%	0%	0%	0%

El parámetro resulta insensible, dado que consiste únicamente en un retardo de la llegada del flujo en torno a la media hora, lo que es despreciable en la escala temporal de 10 años y no influye en el volumen total aportado.

9.2 Calibración del modelo

En el apartado 5.4.1: *Calibración* se ha definido en líneas generales en qué consiste una calibración, qué factores se deben tener en cuenta y cuáles son sus objetivos. En este apartado se detallan las particularidades técnicas del caso de estudio.

La pretensión de esta fase es ajustar los parámetros previamente presentados de forma que, tomando como entrada al modelo las precipitaciones de partida, se obtenga una curva de evolución del embalse ajustada a las mediciones reales. De forma gráfica se muestra en la

Figura 48 la serie de precipitación utilizada como input al modelo, junto con la curva de volumen embalsado observado a lo largo del tiempo:

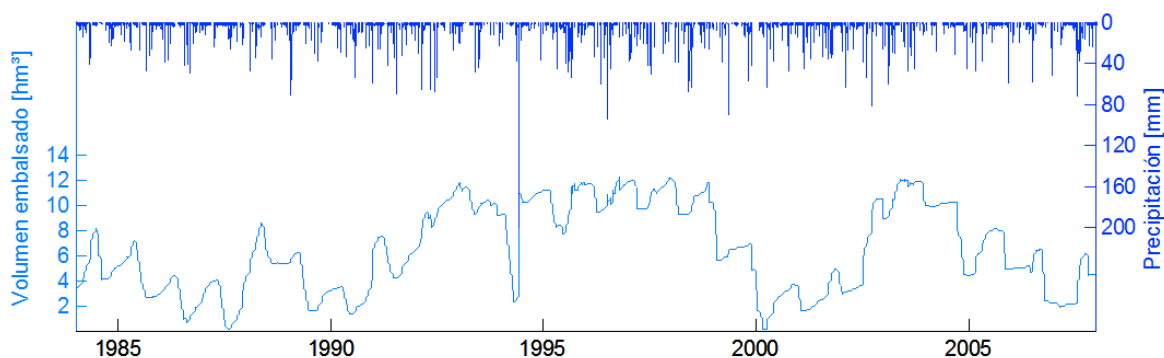


Figura 48: Precipitación y volumen embalsado.

En el caso del presente trabajo, la variable prioritaria a modelar correctamente es el volumen embalsado. Por este motivo se ha establecido como función objetivo la minimización del porcentaje de error del volumen embalsado, contrastando los valores simulados con los observados en la realidad.

Consiguientemente, debe establecerse un criterio de finalización, que indique cuándo la solución obtenida es suficientemente buena. Una buena estrategia es emplear el método de la función de convergencia, la cual termina el proceso iterativo si la diferencia entre el valor actual y el próximo valor es menor o igual a un cierto valor; otro método es la convergencia de los parámetros, donde lo importante es determinar si la diferencia entre los parámetros es menor o igual a un cierto valor; en caso de calibración automática puede establecerse también un criterio de finalización que establezca un número máximo de iteraciones, de modo que si éste se excede, el programa finaliza.

En el caso práctico presentado, para realizar la calibración se han comparado los resultados del modelo con los datos observados variando de forma manual los valores de los parámetros hidrológicos de mayor influencia, de manera que el modelo proporcione resultados cada vez más similares a los registrados.

Como se ha justificado en el análisis de sensibilidad, los procesos que deben ser calibrados con más atención son la infiltración al suelo, subsuelo y acuífero profundo. En particular, los parámetros más influyentes son la capacidad del subsuelo, la tasa de infiltración profunda, y el coeficiente de almacenamiento, siendo éste último el más significativo por requerir de una calibración específica.

Así, de manera iterativa se ha procedido a la calibración de estos parámetros, hasta obtener una serie de volúmenes embalsados similar a la observada. Una vez obtenida, se ha afinado la calibración mediante el uso del resto de parámetros, menos relevantes. Debe mencionarse que

a lo largo de la calibración se ha notado que las sensibilidades de los parámetros cambiaban, apareciendo por ejemplo parámetros cruciales que en un primer momento se tomaban por insensibles.

Tras múltiples iteraciones se ha llegado a una convergencia del error sobre el volumen final de la simulación que, si bien nunca será posible certificar que se trata de un mínimo global, se puede afirmar que se ha hallado un mínimo local de apreciable exactitud.

A continuación se recogen algunos de los hitos relevantes en cuanto a la calibración. Se desarrolló manualmente un total aproximado de 300 simulaciones iterativas hasta reducir el error relativo hasta el 5% (Figura 49):



Figura 49: Gráfico de convergencia para el volumen final acumulado.

El ajuste definitivo de los parámetros una vez calibrado el modelo se presenta a continuación en la Tabla 23 y Tabla 24:

Tabla 23: Valores de los parámetros de las cuencas del modelo una vez realizada la calibración.

Subcuenca:	W180	W190	W200	W210	W220	W230	W240	W250	W260	W270	W280	W290	W300	W310	W320	W330
Almacenamiento en cobertura [mm]	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3
Almacenamiento en superficie [mm]	13	13	14	13	13	14	13	13	13	13	13	13	14	13	14	13
Área impermeable [%]	2	2	1	2	1	2	2	2	1	2	2	2	5	5	1	5
Infiltración máxima al suelo [mm/h]	22	22	21	22	22	22	22	22	21	22	22	22	21	22	21	22
Capacidad del suelo [mm]	42	45	42	45	42	45	48	45	42	45	45	45	48	48	45	48
Capacidad de campo [mm]	38	40	38	40	38	40	42	40	38	40	40	40	42	42	40	42
Percolación al subsuelo [mm]	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22
Capacidad del subsuelo [mm]	95	95	95	95	95	95	95	95	95	95	95	95	95	95	95	95
Percolación profunda [mm/h]	445	445	445	445	445	445	445	445	445	445	445	445	445	445	445	445
Coef. almacenamiento subsuelo [h]	1.21	1.21	1.21	1.21	1.21	1.21	1.21	1.21	1.21	1.21	1.21	1.21	1.21	1.21	1.21	1.21
Tiempo de Concentración [h]	1.42	0.75	1.19	0.67	1.11	0.87	1.47	0.66	2.18	0.77	0.42	0.41	1.66	1.71	1.93	0.78
Coef. Almacenamiento cauce [h]	1.42	0.75	1.19	0.67	1.11	0.87	1.47	0.66	2.18	0.77	0.42	0.41	1.66	1.71	1.93	0.78
Coef. Almacenamiento flujo base [h]	200	220	220	200	200	200	190	200	180	230	200	200	180	200	200	200

Tabla 24: Valores de los parámetros de los cauces del modelo una vez realizada la calibración.

Cauce:	R40	R70	R80	R110	R130	R150	R170
Tiempo de Retardo [h]	0.33	0.47	0.2	0.28	1.21	0.24	1.45

La comparativa gráfica entre los valores observados y simulados tras la calibración final se muestra en la Figura 50:

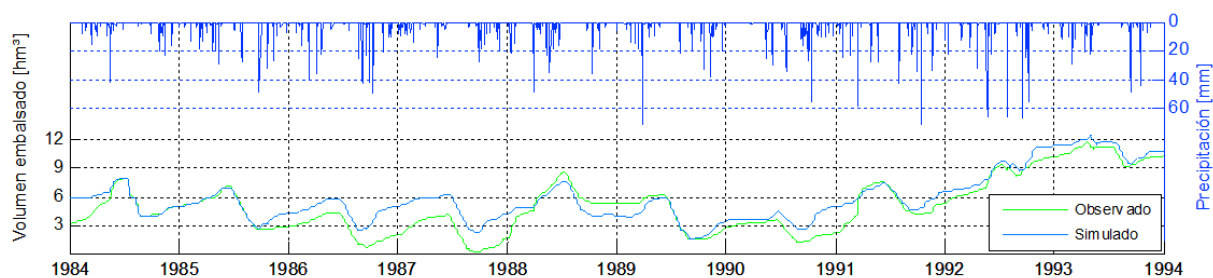


Figura 50: Comparativa del volumen embalsado en función del tiempo. Datos observados y simulados.

Observamos tendencias altamente similares entre los datos observados y simulados tras la calibración, lo que arrojan confianza sobre los resultados del modelo.

Podemos estudiar también la comparativa entre hidrogramas (Figura 51), lo que resulta menos interesante por no ser el objeto explícito del trabajo.

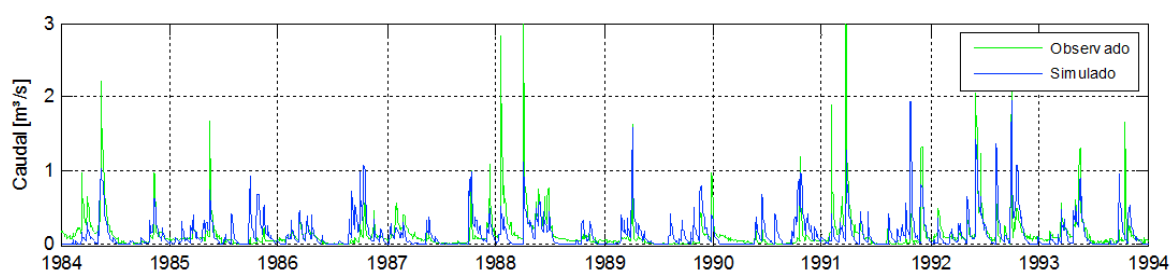


Figura 51: Comparativa del hidrograma de entrada al embalse. Datos observados y simulados.

Los resultados se comentarán junto a la validación en el apartado 9.4: *Discusión*.

9.3 Validación del modelo

El proceso de validación conduce a la aceptación del modelo como un simulador fiable del sistema físico. Esto no significa que sus resultados deban aceptarse como estrictamente verdaderos, sino que su estructura está limpia de errores obvios y lógicos (Oreskes et al. 1994) sugiriendo un buen grado de coherencia entre el sistema físico y el modelo. Sin embargo, la cuestión es de qué manera se demuestra que el modelo refleja con fiabilidad el comportamiento de la cuenca. El método más común es la comparación entre la respuesta medida (obtenida con observaciones *in situ*) y los resultados ofrecidos por el modelo. De este modo, se ha realizado una nueva simulación con el modelo ya calibrado, procesando los registros de lluvia desde 1998 hasta 2008 y comparando la respuesta simulada con el registro de volúmenes que se posee. El resultado se muestra a continuación:

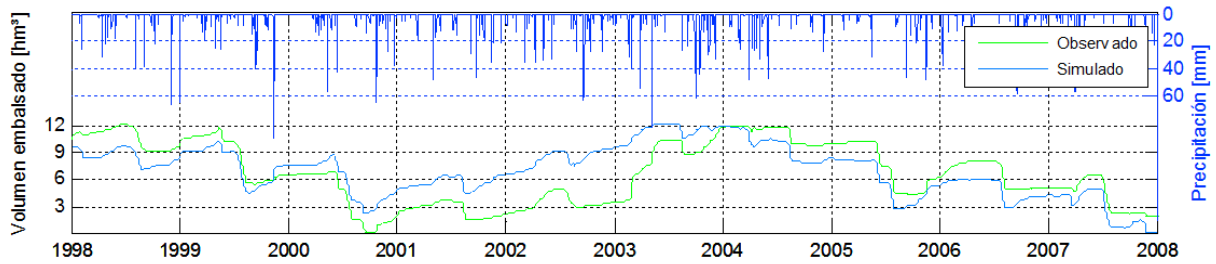


Figura 52: Comparativa del volumen embalsado en función del tiempo. Datos observados y simulados.

Del mismo modo, a continuación se muestra la comparativa de hidrogramas de entrada al embalse:

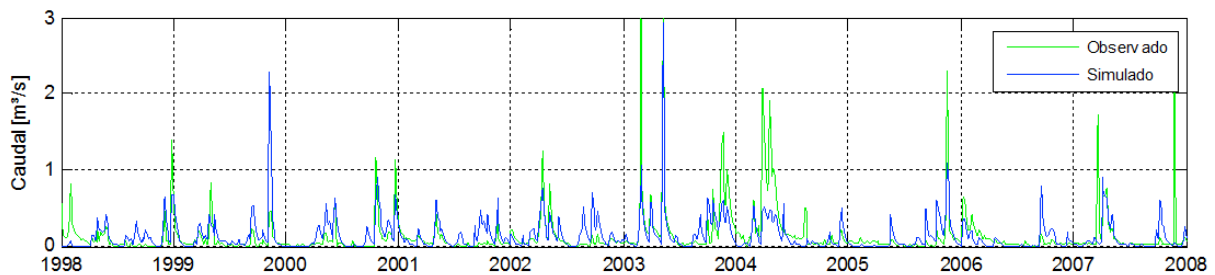


Figura 53: Comparativa del hidrograma de entrada al embalse. Datos observados y simulados.

Los resultados se comentarán junto a la calibración en el apartado 9.4: *Discusión*.

9.4 Discusión

Se ha reservado este apartado para comentar la bondad de la calibración y validación, pues ello requerirá una visión global y contemplativa de todos los factores intervinientes, así como datos de partida e hipótesis tomadas durante el proceso.

Siguiendo las indicaciones previas sobre la evaluación de la bondad de la calibración en términos de los parámetros NSE (Molnar, 2011) y RSR (Moriassi, 2007), se ha calculado el valor mensual de ambos indicadores para el periodo calibrado. Los resultados indican que un 21% de los datos presentan un ajuste satisfactorio, encontrando 5 meses con una calidad de ajuste excelente.

Aplicando los mismos criterios por los parámetros de RSR y NSE, se obtiene para la validación un ajuste satisfactorio para el 15% de los datos, con 5 meses de ajuste excelente. El resto del periodo no se consideraría satisfactorio en estos términos. En efecto, una ventana temporal tan grande y unos datos de lluvia promediados cada 24h no pueden ofrecer una calidad de ajuste aceptable cuando se trata del hidrograma, pese a que en promedio sí se conserve el volumen total aportado. Una mayor calidad de los datos de entrada y un estudio focalizado por eventos (y no en simulación continua) permitiría una calibración más ajustada, mientras que la resolución temporal actual no permite un mejor ajuste en términos del hidrograma de entrada.

En cualquier caso, la calidad de ajuste del hidrograma se considera globalmente satisfactoria dadas las características del estudio, y teniendo en cuenta que el objeto de este trabajo es la calibración del volumen embalsado. Además, la inexactitud obtenida es en su mayor medida, fruto de la acumulación de pequeños errores en el tiempo, lo que no tiene cabida en la fase de explotación de la herramienta. Las previsiones futuras se realizarán a 3 meses vista y la actualización del nivel del embalse será mensual, por lo que no habrá lugar para las acumulaciones de errores observadas tras hasta 10 años de simulación continua sin confrontación con la realidad.

En todo caso, en un intento por caracterizar de un modo más tangible y controlable el error asociado a las simulaciones, se ha procedido al ajuste del error relativo a una función de distribución de probabilidad. Tras hallar la serie completa de errores relativos para la calibración, se ha elaborado su histograma de frecuencias y se han probado múltiples funciones de densidad de probabilidad con el fin de detectar si existe alguna que pueda estar asociada al error relativo.

Las funciones contempladas fueron las siguientes: Asimétrica Potencial, Asimétrica de Laplace, Beta, Birnbaum-Saunders, Burr Tipo XII, Exponencial, Extremal, Gamma, Extremal Generalizada, Generalizada de Pareto, Gaussiana Inversa, Logística, Loglogística, Lognormal, Nakagami, Binomial Negativa, Normal, Poisson, Rayleigh, Rician, Weibull. Algunas de ellas fueron desestimadas antes de proceder a su ajuste dado que no eran aptas para el dominio de estudio particular.

Finalmente, se encontró un buen ajuste para la Función de Densidad de Probabilidad Asimétrica de Laplace, función continua consistente en una doble exponencial, una de ellas negativa, de forma adyacente. Esta función es el resultado de una generalización de la Función de Laplace que la convierte en asimétrica. Su expresión es la siguiente:

$$f(x; m, \lambda, \kappa) = \left(\frac{\lambda}{\kappa + \frac{1}{\kappa}} \right) \cdot \begin{cases} e^{\frac{\lambda}{\kappa}(x-m)} & \text{si } x < m \\ e^{-\lambda \cdot \kappa \cdot (x-m)} & \text{si } x \geq m \end{cases}$$

Dónde:

- x es el valor de la variable aleatoria, en este caso el error relativo del volumen simulado sobre el real;
- m es el punto de conexión entre ambas exponenciales negativas, en el caso práctico $m=0$;
- $\kappa > 0$ es el factor de asimetría de la función, ajustado manualmente a $\kappa = 0.5627$;
- $\lambda > 0$ es el factor de escala de la función, ajustado manualmente a $\lambda = 0.0675$.

Con los valores presentados, los datos originales y la Distribución Asimétrica de Laplace (ALD) ajustada presentan el siguiente aspecto (Figura 54):

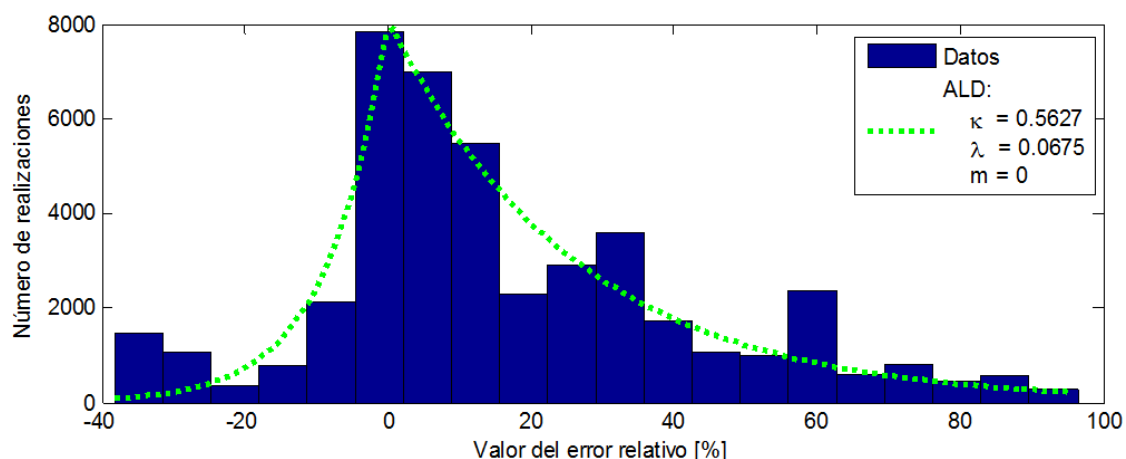


Figura 54: Error relativo de las simulaciones y función ALD ajustada tras la calibración.

Puede observarse cómo la moda de la distribución está situada sobre el valor 0, lo que significa que el resultado más esperable de la simulación es un error relativo nulo. Se demuestra así que lo más probable es que el resultado del modelo sea correcto.

Por otro lado, se observa una clara asimetría en la distribución, hecho que ha obligado al uso de la función ALD. Esta asimetría indica que el modelo es más propenso a dar como resultado un volumen mayor al real. Esto debe tenerse en cuenta, pues mientras que este carácter nos sitúa del lado de la seguridad en caso de peligro de avenidas y desbordamientos, en situaciones de sequía los valores pueden ser excesivamente optimistas.

Se remarca que la validación no presenta la misma bondad en los resultados que en la fase de calibración, como es de esperar. A continuación se comparan para ambas fases los resultados obtenidos y los reales, de modo que la correspondencia perfecta se encontraría en la recta 1:1 o diagonal:

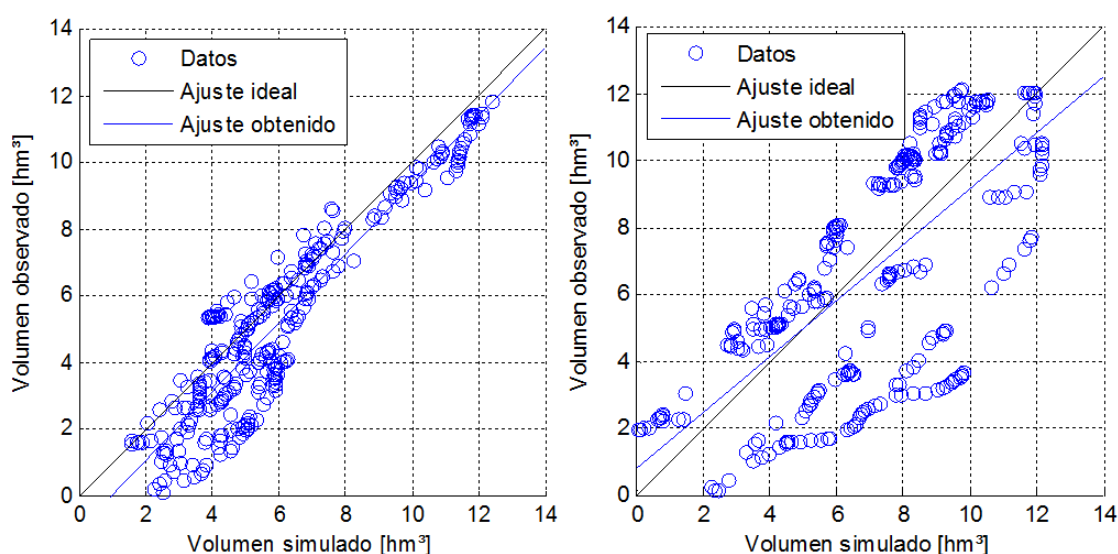


Figura 55: Comparativa de las observaciones y simulaciones. Izquierda: Calibración. Derecha: Validación.

Mediante estos análisis y herramientas estadísticas se ha pretendido caracterizar el error asociado a las simulaciones del modelo, dado que éste resulta técnicamente imposible de eliminar. Es importante realizar este análisis crítico para conocer las propias limitaciones e interpretar correctamente los resultados obtenidos.

9.5 Fuentes de incertidumbre

A continuación se citan algunas de las causas por las que el proceso de calibración-validación ha podido verse alterado, imposibilitando su mayor calidad de ajuste.

En primer lugar, los datos de precipitación son magnitudes diarias, lo que conlleva una enorme simplificación al agregar la serie diaria completa a un solo dato. Como se ha comentado en el apartado 7.1.2: *Pluviometría*, las lluvias de la zona son de carácter orográfico, de intensidad elevada y algunas horas de duración. Esto implica que un único dato diario no aporta toda la información necesaria, y menospreciará el pico del pluviograma. A su vez, eso conlleva a subestimar el pico del hidrograma, pues los procesos de escorrentía torrencial no se ven correctamente modelados si la lluvia ha sido promediada temporalmente.

Por otro lado, no se ha considerado la variabilidad espacial de la lluvia, sino que se ha tomado como uniforme asignando como valor medio los datos de la estación de Cornudella. Observando la Figura 12 se comprueba que la estación, pese a ser la más cercana de las disponibles, se encuentra en el extremo inferior izquierdo, coincidiendo con uno de los puntos más bajos y llanos de la cuenca asociada al embalse. Por el contrario, los puntos más elevados y abruptos -las montañas de Prades- están situados en el extremo opuesto al pluviómetro, siendo éstos donde se espera una mayor intensidad de lluvia por las condiciones orográficas comentadas en el apartado 7.1.2: *Pluviometría*. Ello conduce a pensar que la serie de lluvia utilizada para simular el volumen almacenado puede ser sistemáticamente inferior a la lluvia real promedio de la cuenca. A modo de ejemplo, se tiene constancia de que en las montañas de Prades precipitaron 400mm el día de 10 de octubre de 1994, cuando la serie de datos indica un valor de 200mm. Las irregularidades de precipitación por factores orográficos en el dominio de estudio constituyen un caso paradigmático en Cataluña.

Las mediciones de caudal de entrada y salida también tienen una cadencia diaria. A su vez, los valores provienen de mediciones puntuales en un instante concreto, y no a un promedio temporal. Por otro lado, el caudal no es medido directamente, sino de forma indirecta a través del calado de agua circulante, por lo que el valor real de caudal puede diferir. Estas incertidumbres justifican que la calibración en términos de ajuste del hidrograma no sea tan relevante como el volumen final aportado.

Debe mencionarse que la calibración se ha realizado para la serie temporal 1984-1994. Esto significa que la versión resultante es óptima para esta serie, es decir, el modelo simulará mejor

con tales datos. Sin embargo, algunos fenómenos, como ciertas secuencias específicas de sucesos de precipitación que no ocurrieron durante el período utilizado para la calibración, sí pudieron acontecer en otros momentos o bien aparecer en el futuro. El modelo no ha sido calibrado teniendo en cuenta dicha eventualidad. El caso contrario también puede darse: los fenómenos con los cuales el modelo ha sido calibrado no necesariamente tienen que estar presentes en otros periodos. Lo mismo puede decirse de la validación. Es por ello que siempre debe pretenderse obtener una serie de datos de entrada lo más extensa posible.

Debe tenerse siempre en cuenta que tanto la calibración como la validación nunca podrán ser completas, por la misma aleatoriedad de la propia realidad que pretende modelarse. Esta frontera es común a todos los modelos numéricos que pretenden simular la realidad, y pese a que siempre debe progresarse en expandir dicha frontera, existirá siempre algo en lo desconocido e impredecible. Es tarea de los modeladores el transmitir este concepto a los beneficiarios de la modelación que sin embargo no estén familiarizados con estos principios básicos.

Tras analizar los resultados se tiene la noción de que el modelo simula con éxito ciertos periodos, mientras que en otros tiende a desviarse. En el caso de la validación, se ha notado que existe una polarización de los resultados según si subestiman o sobreestiman el volumen real embalsado. Esta polarización no es aleatoria, sino que el carácter se mantiene durante ciertos periodos de forma continuada. Se recomienda estudiar las características de la lluvia y demás variables y procesos con el fin de obtener qué provoca la subestimación o sobreestimación diferenciada temporalmente. Visto el comportamiento, podría ser interesante calibrar el modelo discriminando dichos periodos de forma de conseguir un ajuste particularizado según las características meteorológicas específicas de cada periodo.

Se recomienda, con el fin de incrementar la bondad de los ajustes, adquirir una mayor calidad y cantidad de datos, instrumentalizando la cuenca y mejorando su capacidad de muestreo. El primer paso necesario es la instalación de nuevos pluviómetros que garanticen una mayor cobertura de los fenómenos locales que rompen con la uniformidad espacial de la lluvia. Asimismo, será importante que su frecuencia de muestreo sea inferior a la diaria actual, siendo recomendable un muestreo horario para mejorar la calidad del ajuste.

Finalmente, debería establecerse una cooperación entre los distintos agentes implicados para mejorar el comportamiento del modelo y la predictibilidad de la realidad misma. Ello implicaría la puesta a disposición de valores instantáneos y previsiones por parte de los operadores de las estructuras de desagüe, los demandantes del recurso hídrico y la agencia meteorológica.

10. Modelo predictivo

En esta última parte se pretende materializar la potencialidad más importante y necesaria del modelo hidrológico: la predicción del estado futuro del embalse.

Una vez se ha desarrollado, calibrado y validado el modelo hidrológico, para obtener una previsión de la evolución del volumen del recurso hídrico disponible se requieren los mismos datos utilizados para la calibración, esto es: previsión de precipitaciones, temperaturas y extracciones del embalse.

Sin embargo, como se ha puesto de manifiesto en el apartado 5.3.1: *La Previsión Meteorológica*, las previsiones a medio-largo plazo distan mucho de ofrecer una calidad aceptable para su uso como datos de partida de una simulación hidrológica. Las previsiones fruto de modelación numérica meteorológica pueden ofrecer resultados aproximados para una ventana de unos 10-14 días (AEMET, 2016), lo cual si bien puede ser suficiente para prevenir de una gran avenida y evacuar anticipadamente el embalse, no ofrece una antelación suficiente como para poner en marcha un plan de medidas en caso de sequía. Para obtener previsiones meteorológicas en una ventana temporal más amplia, es posible hacer uso de la llamada Predicción Estacional de la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET).

En este apartado se ha hecho uso de la predicción estacional para los meses de mayo-junio-julio de 2016 con el fin de establecer una predicción cuantitativa del estado del embalse de Siurana mediante el modelo previamente desarrollado. El margen temporal del trabajo ha permitido validar la previsión del mes de mayo, pudiendo entonces actualizar la previsión original para el trimestre junio-julio-agosto. El proceso seguido se ha desarrollado en términos estocásticos dada la naturaleza del problema y de los datos de partida, tomando finalmente los valores más probables.

10.1 Predicción estacional

La predicción estacional se realiza con el fin de predecir las tendencias climáticas que se darán con mayor probabilidad en una ventana temporal de varios meses. Existe una gran incertidumbre en estas predicciones, dada la escasa predictibilidad atmosférica para dichas ventanas de tiempo. Esto limita o anula la capacidad de previsión de los modelos numéricos de predicción del tiempo, cuya fiabilidad no debería extenderse a alcances superiores a 10-14 días.

Ante la imposibilidad pues de emplear modelos numéricos de previsión climática en el ámbito temporal de interés, se han desarrollado internacionalmente dos escuelas para elaborar predicciones estacionales:

- Métodos estadísticos:

Dichos métodos establecen escenarios predictivos basados en las tenues señales de predictibilidad atmosférica que proporcionan variables tales como la temperatura del agua del mar, quien amortigua e influye en los cambios de evaporación y temperatura atmosférica. Otras variables a contemplar son, por ejemplo, la cobertura de nieve y el contenido de humedad del suelo.

Todos estos elementos tienen en común que su efecto en las condiciones climáticas es retardado y persistente, pudiendo estimar a través de ellos los escenarios climatológicos futuros. Mediante un estudio estadístico retrospectivo de los indicios definidos y la evolución climatológica del momento, se establecen relaciones causa-efecto entre las variables y la respuesta temporal.

Estos modelos resultan económicos computacionalmente y simples a la hora de utilizar, ya que no se debe realizar ninguna previsión futura de comportamiento. Toda previsión está fundamentada en el estado de las variables indicadoras en el momento presente en que se realiza la predicción.

- Métodos dinámicos:

Los métodos dinámicos se sirven de modelos numéricos trabajando conjuntamente en distintos ámbitos cuyo efecto también tiene una influencia retardada en el clima, tales como la circulación general del océano o los vientos de la atmósfera y su procedencia. De este modo es posible generar una predicción basada en distintos indicadores tras realizar verdaderamente una simulación a futuro, a diferencia de los métodos estadísticos que no tienen en cuenta ningún cálculo predictivo.

Sin embargo, ello implica un fuerte coste computacional, y deben tenerse en cuenta las incertidumbres intrínsecas de las predicciones simples que finalmente permiten establecer la predicción estacional.

10.2 Precipitación cualitativa de AEMET

AEMET ha desarrollado en los últimos años un modelo estadístico de predicción estacional para la península ibérica, con el fin de dar respuesta a la importante demanda de predicción, sirviéndose para ello de los últimos avances a nivel internacional que permiten estimar de modo orientativo las características climatológicas próximas.

La predicción se realiza mediante una rejilla de alrededor de 50 km de resolución y para una ventana temporal de cuatro trimestres. Sin embargo, dichas estimaciones deben considerarse con cautela y en términos probabilísticos. Además, pese a que AEMET realiza dichas previsiones en formato numérico, su publicación es siempre en términos cualitativos, sin la posibilidad de

extraer datos numéricos. Por otro lado, la información publicada corresponde únicamente a los tres meses siguientes. No ha sido posible obtener de esta fuente una información de mayor calidad que la publicada oficialmente.

Así, la información disponible para el desarrollo del trabajo procedente de AEMET está promediada en 6 regiones distintas de España, estando la península ibérica segregada en cuatro, a las cuales se agregan los archipiélagos balear y canario.

La información sobre precipitación es cualitativa. El valor ofrecido corresponde a la probabilidad de que la precipitación se sitúe en el rango de cada uno de los tres terciles de lluvia del periodo 1981-2010. Esto es, si se toman los datos trimestrales de precipitación acumulada de dicha serie de años, y se ordenan de mayor a menor, los valores que acumulan el 33% y el 66% del total de datos delimitan los tres terciles de la serie. De este modo, la predicción nos indica la probabilidad de que el volumen de lluvia acumulado en los próximos tres meses se sitúe en cada tercil.

Los terciles de precipitación trimestral acumulada son también ofrecidos por la AEMET en la siguiente imagen (Figura 56):

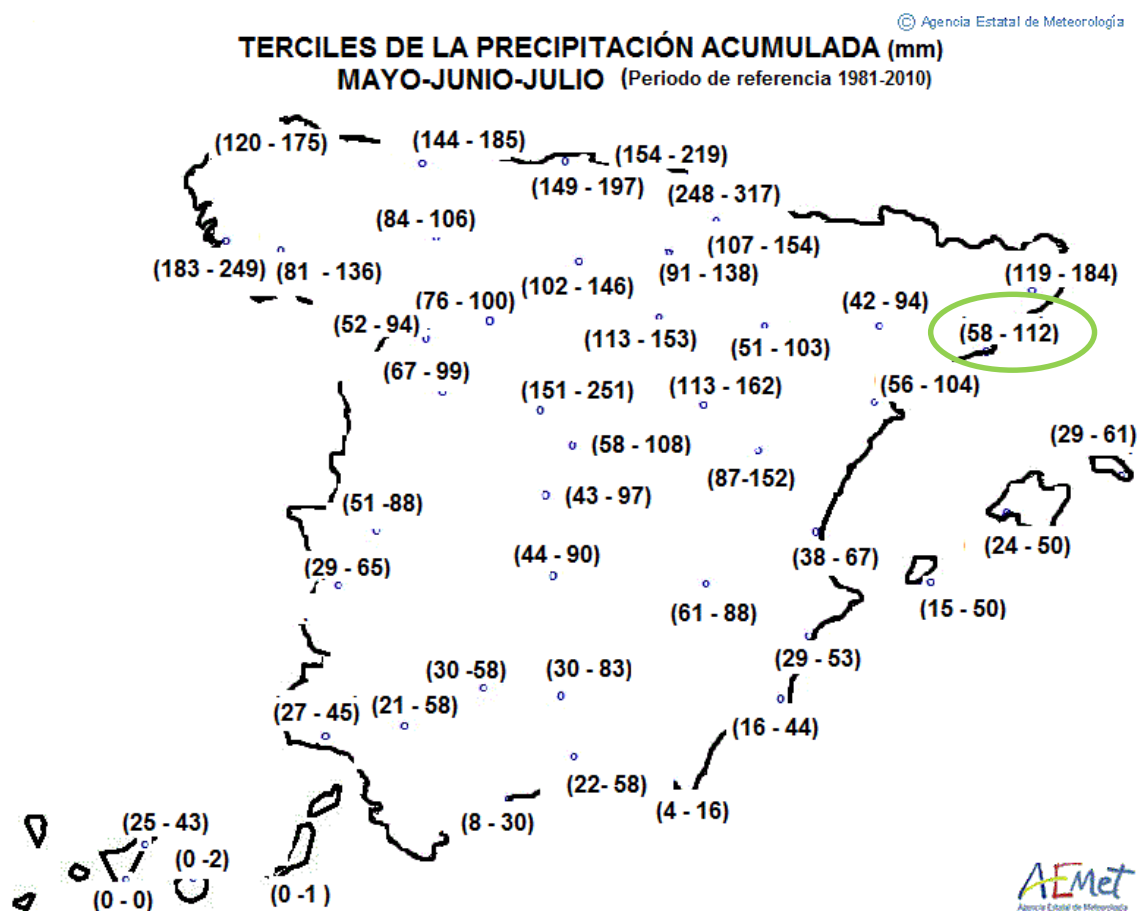


Figura 56: Terciles de volumen trimestral precipitado en España, datos 1981-2010. AEMET (2016).

En el caso del presente trabajo, los terciles apropiados son los marcados en verde, 58mm y 112 mm. Esto significa que, entre los años 1981 y 2010, el 66% de los valores acumulados en mayo, junio y julio han sido inferiores a 112 mm, y que el 33% ha estado por debajo de 58 mm.

De este modo, AEMET nos da la probabilidad de que en los próximos mayo, junio y julio la lluvia total precipitada sea inferior a 58mm, superior a 112mm, o entre ambos umbrales. Así, estos terciles definen tres escenarios posibles de precipitación: *superior a lo habitual o húmedo*, *habitual o normal*, e *inferior a lo habitual o seco*. Esto se nos muestra en el siguiente diagrama, obtenido de su portal web:

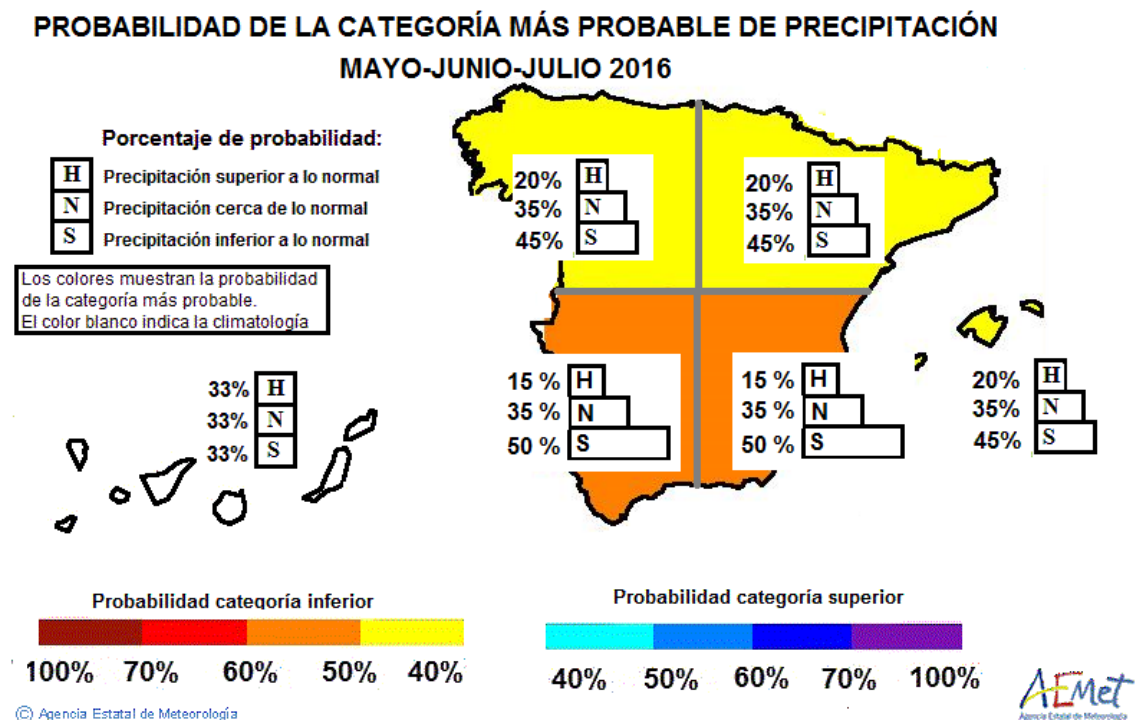


Figura 57: Previsiones de precipitación para el trimestre mayo-junio-julio de 2016. AEMET (2016).

Si observamos el cuadrante donde se encuentra Catalunya, la predicción estacional establece que las lluvias acumuladas en el siguiente trimestre estarán situadas en el primer tercil, esto es, serán inferiores a 58mm, con un 45% de probabilidad. Siguiendo el mismo razonamiento, la probabilidad de que la precipitación acumulada sea superior a 58 mm e inferior a 112 mm es de un 35%, y superior a 112 mm con un 20% de probabilidad.

Este mismo tipo de predicción se nos ofrece también con los valores trimestrales de temperatura. Sin embargo, estos valores presentan muy poca variabilidad (los terciles son muy próximos entre ellos, siendo sus límites 19.8 °C y 21.2 °C), y dada también la baja sensibilidad del modelo a los procesos de evapotranspiración, se ha desestimado su influencia y se han tomado valores promedio.

10.3 Cuantificación de una previsión cualitativa

La metodología desarrollada, propuesta y aplicada en el presente trabajo para aprovechar la predicción estacional de AEMET en la cuenca del embalse de Siurana consiste en definir, en base a la predicción cualitativa, distintos escenarios cuantitativos de lluvia. Se evalúa la respuesta del embalse para cada uno de ellos, y de este modo se extraen conclusiones tales como el escenario pésimo, el óptimo, el medio, la variabilidad entre ellos, el resultado más probable y otras observaciones.

Se ha discretizado el conjunto de datos pluviométricos por meses desde el 1 de enero de 1984 hasta el 31 de diciembre de 2008, resultando en un total de 288 meses. Éstos se han agrupado según el mes del año al que pertenecen, con el fin de obtener el pluviograma medio mensual de la serie. En las siguientes figuras se muestra el conjunto de datos segregados y superpuestos por meses (Figura 58), y el pluviograma promedio obtenido por cada mes para los 24 años de estudio (Figura 59):

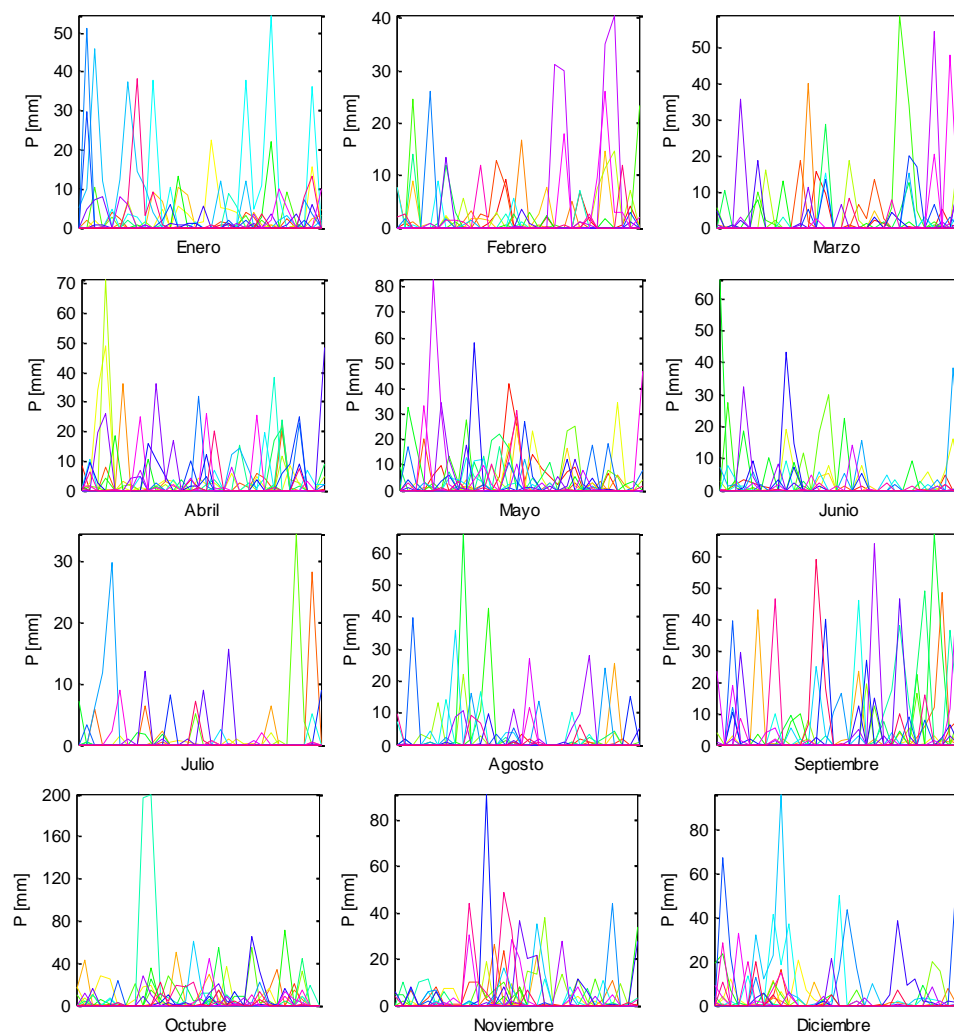


Figura 58: Pluviogramas mensuales en Cornudella para los años 1984-2008. Valores diarios.

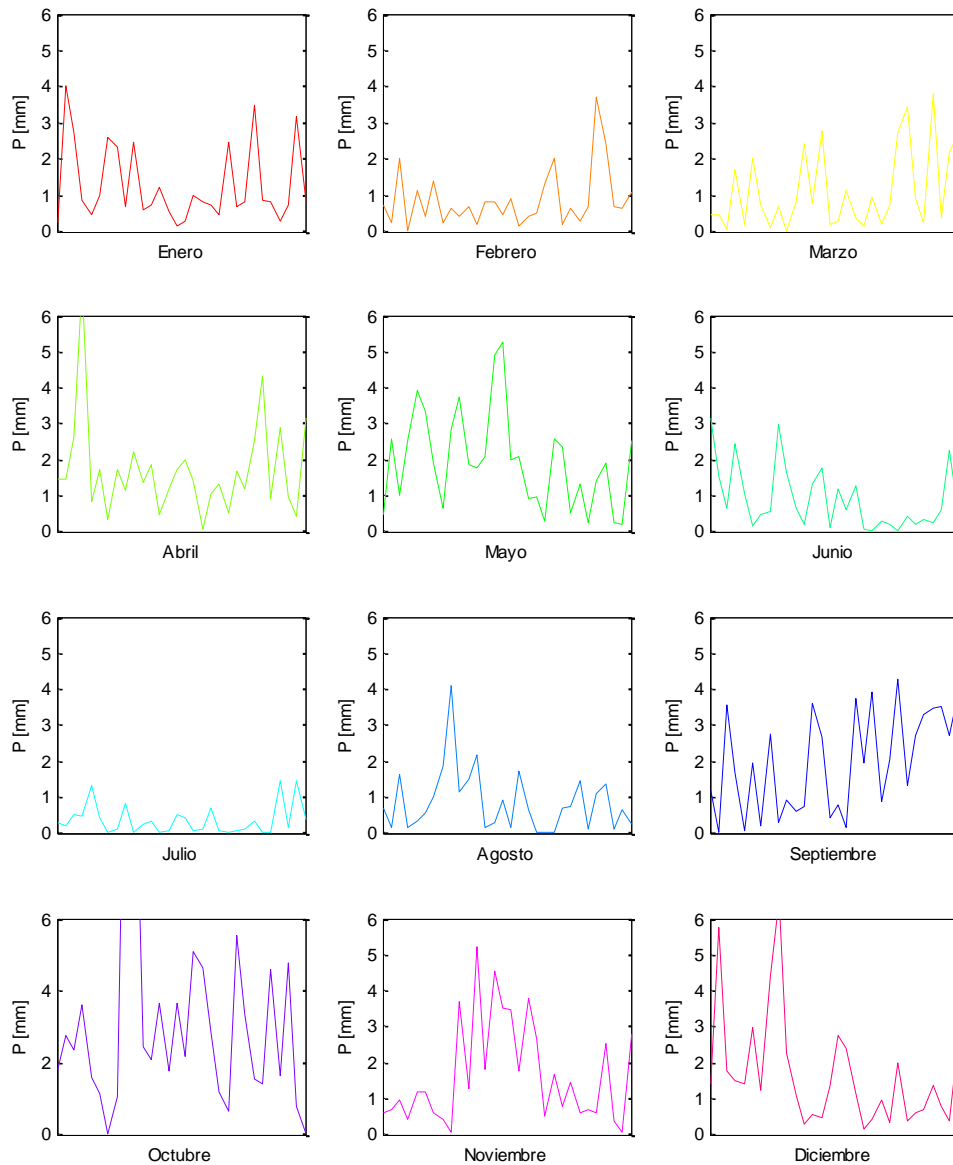


Figura 59: Pluviogramas mensuales promedio en Cornudella entre 1984 y 2008. Precipitación diaria.

De este modo se tienen los patrones base de lo que corresponde a la pluviometría de un año medio. Si promediamos a su vez los valores de cada mes, obtenemos el ciclo medio anual de precipitaciones en Cornudella (Figura 60), como se había presentado anteriormente (Figura 13):

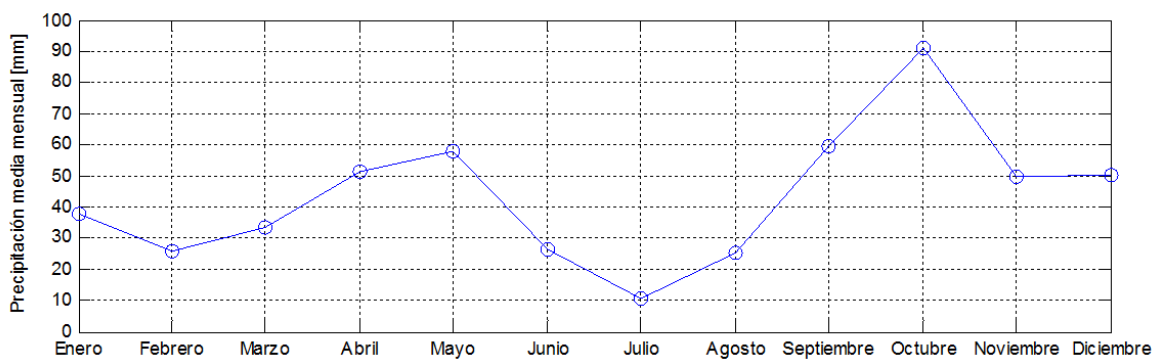


Figura 60: Precipitación media mensual para los años 1984-2008 en la estación de Cornudella.

En particular, los meses de mayo, junio y julio presentan una precipitación media de 58.2 mm, 26.3 mm y 10.5 mm respectivamente, lo que suma un valor promedio trimestral de 95 mm. Comprobamos pues que el valor promedio trimestral queda aproximadamente centrado entre los terciles facilitados por AEMET para la zona de estudio (58 mm y 112 mm), coherencia que arroja fiabilidad en los datos.

Para cuantificar la previsión cualitativa de AEMET se propone realizar una simulación de Monte Carlo, que tome como datos de entrada la distribución de precipitaciones predicha por AEMET. Se genera un conjunto de escenarios para el trimestre que se pretende estudiar. Este conjunto no se ha designado de forma aleatoria, sino que se ha adaptado a la previsión cualitativa:

- Precipitaciones superiores a 112mm con un 20% de probabilidad;
- Precipitaciones entre 112 mm y 58 mm con un 35% de probabilidad;
- Precipitaciones inferiores a 58 mm con un 45% de probabilidad.

En base a estas predicciones, los escenarios generados satisfarán las indicaciones como sigue:

- El 20% de los escenarios comportará una precipitación superior a 112mm;
- El 35% de los escenarios comportará una precipitación de entre 58 mm y 112mm;
- El 45% de los escenarios comportará una precipitación inferior a 58 mm.

Dentro de cada grupo de escenarios, la distribución de lluvias será uniformemente aleatoria entre los siguientes valores:

- Entre 112 mm y el valor máximo trimestral observado, esto es, 219.5 mm.
- Entre 58 mm y 112 mm;
- Entre el valor mínimo trimestral observado, esto es, 11.3 mm, y 58 mm.

Se justifica que la distribución dentro de cada tercil sea uniforme por el hecho de que, con sólo 24 años de lecturas, no podemos extraer más que 24 promedios trimestrales, los cuales no son suficientes para establecer una distribución de probabilidad de la lluvia. Además, el estudio de estos valores revela que, aparentemente, la distribución de probabilidad de lluvia es precisamente uniforme, como se muestra en la Figura 61:

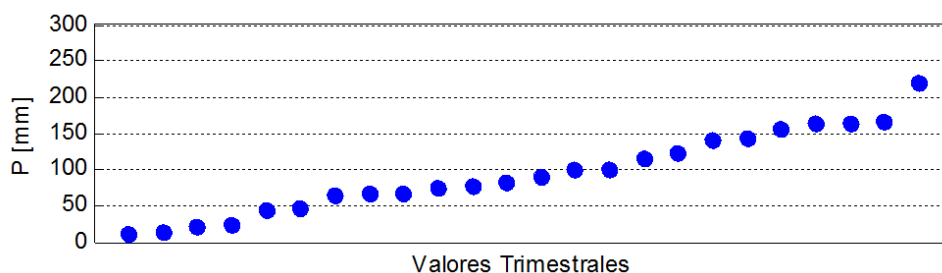


Figura 61: Precipitación media trimestral mayo-junio-julio para los años 1984-2008.

En efecto, ordenando de menor a mayor los datos medios trimestrales, no se observa ninguna preferencia relevante en cuanto a valores de precipitación, por lo que se toma una distribución uniforme.

Una vez definidos todos los prerequisites, se ha generado un total de 100 escenarios que cumplan con las condiciones mencionadas. Como patrón base se han utilizado los pluviogramas promediados mensualmente presentados en la Figura 59 para los meses de mayo, junio y julio, alterando sus valores en función de la lluvia total acumulada que se desea simular.

El patrón base trimestral y los pluviogramas modificados para cada escenario se muestran en la siguiente figura (la línea negra central marca el patrón base de precipitaciones):

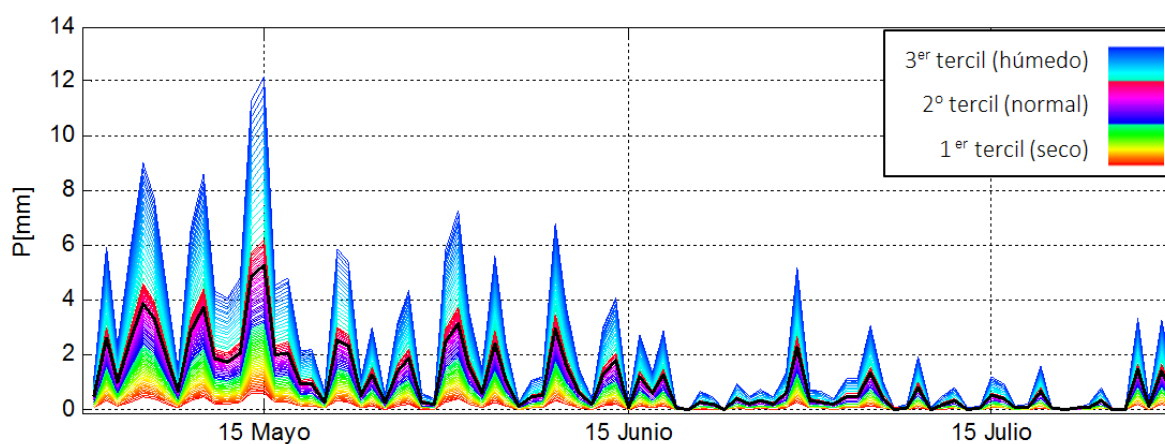


Figura 62: Escenarios de precipitación en base a la previsión estacional de AEMET para el trimestre mayo-junio-julio de 2016. Precipitación diaria.

Finalmente, solo queda simular cada escenario mediante el Modelo Hidrológico en HEC-HMS previamente desarrollado para conocer la respuesta estocástica del embalse de Siurana. La condición inicial de nivel del embalse se ha tomado de los datos disponibles en www.embalses.net, donde para el día 1 de mayo se indicaba un volumen acumulado de 9 hm^3 , correspondientes a un nivel del agua de 481.15 msnm (Figura 25).

A continuación se comentan los resultados tras realizar la simulación de Monte Carlo para los 100 escenarios. En primer lugar se muestra la evolución del volumen embalsado sin considerar extracciones de agua. De este modo podemos prever cuál sería el nivel máximo y mínimo esperable en condiciones de nula demanda de recurso. El resultado es el siguiente:

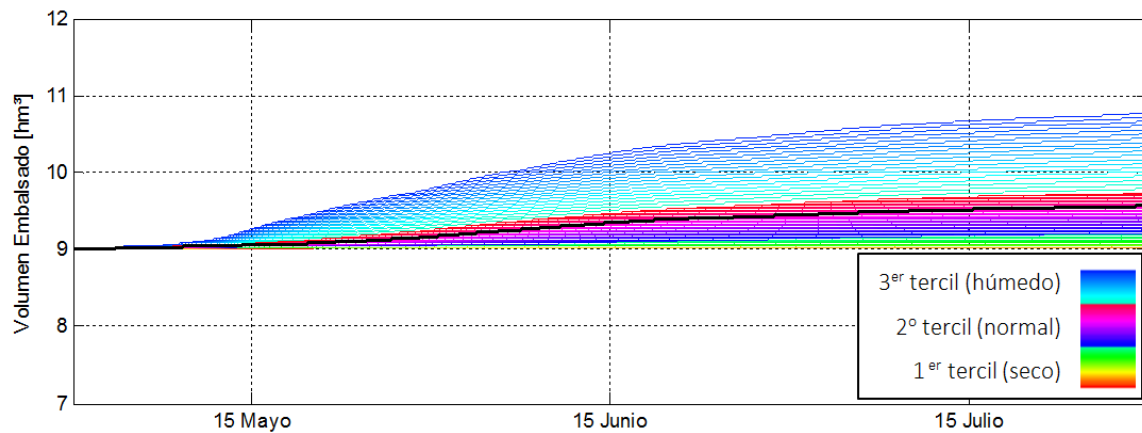


Figura 63: Resultados de la simulación de Monte Carlo en HEC-HMS para mayo-junio-julio 2016.

Observamos cómo claramente existe una cota superior e inferior de los escenarios posibles. Si tenemos en cuenta que la capacidad máxima del embalse es de 12 hm^3 , puede concluirse que en ningún caso el nivel superará el umbral del aliviadero, por lo que la región aguas abajo de la presa está a salvo de riesgo de avenidas y no será necesario el desembalse preventivo. Podría estudiarse también, por ejemplo, cuál es el periodo de retorno de la avenida más grande frente a la cual la seguridad está garantizada.

A partir de la Figura 63, es posible comenzar a trazar la estrategia de repartición de recursos hídricos con un alto grado de confianza para los próximos tres meses. Si se conocen las demandas futuras, puede evaluarse el estado final tras los 3 meses de simulación, y ello puede constituir una herramienta de elevada utilidad para gestionar dichas demandas de modo que se asegure un volumen mínimo deseable.

Se ha querido simular un ejemplo de predicción considerando la demanda del embalse para evaluar los resultados esperables. Ante el desconocimiento de la demanda prevista para este trimestre de 2016, se ha considerado una demanda típica a partir de los datos de salida del embalse existentes para la serie 1984-2008 (Figura 23).

En particular, se ha asumido que la demanda diaria es igual al promedio diario de las extracciones para la serie de datos. Las extracciones para dichos años segregadas mensualmente se muestran en la Figura 64, y su valor diario promediado se muestra en la Figura 65:

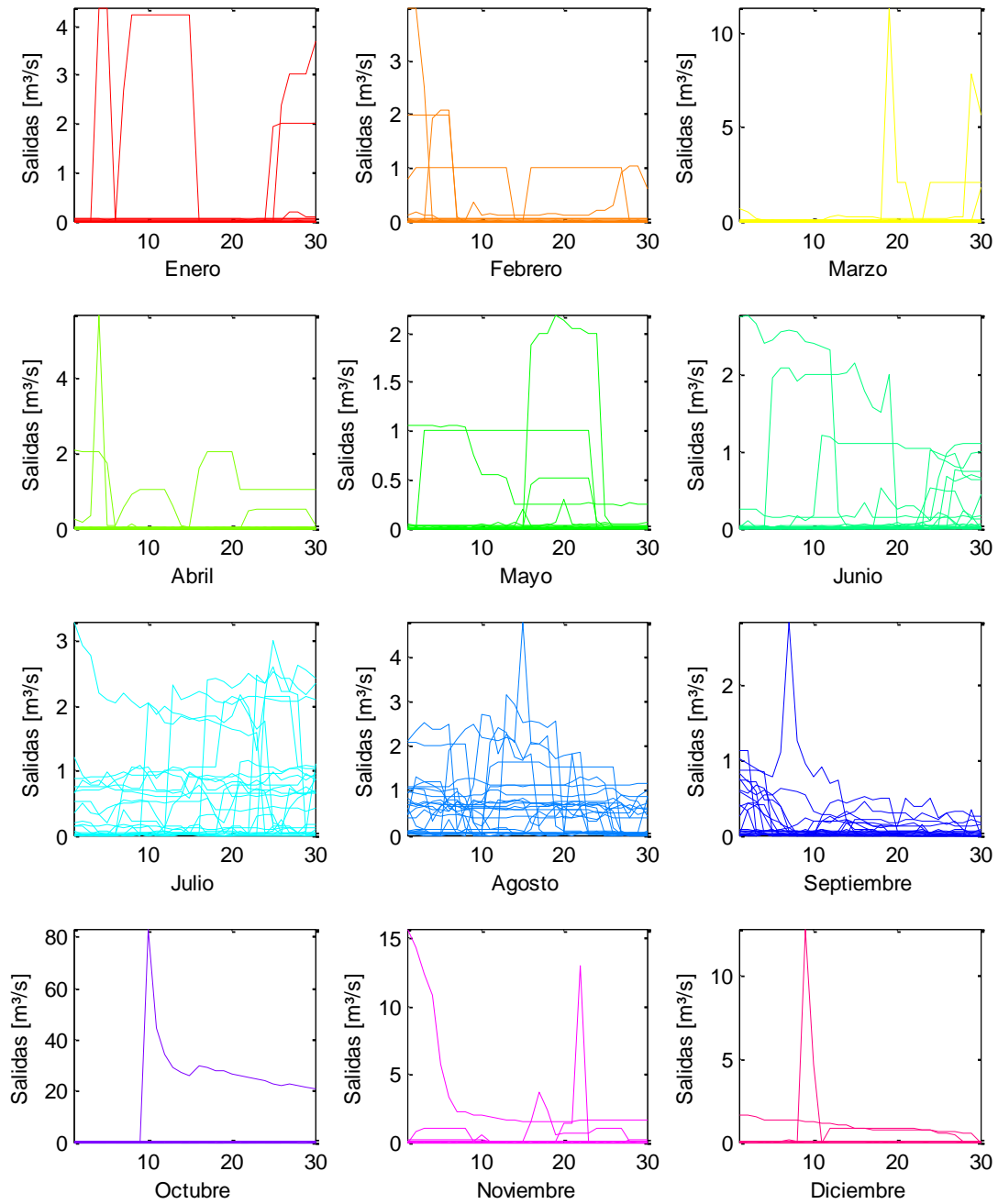


Figura 64: Extracciones diarias de recurso por meses para la serie 1984-2008.

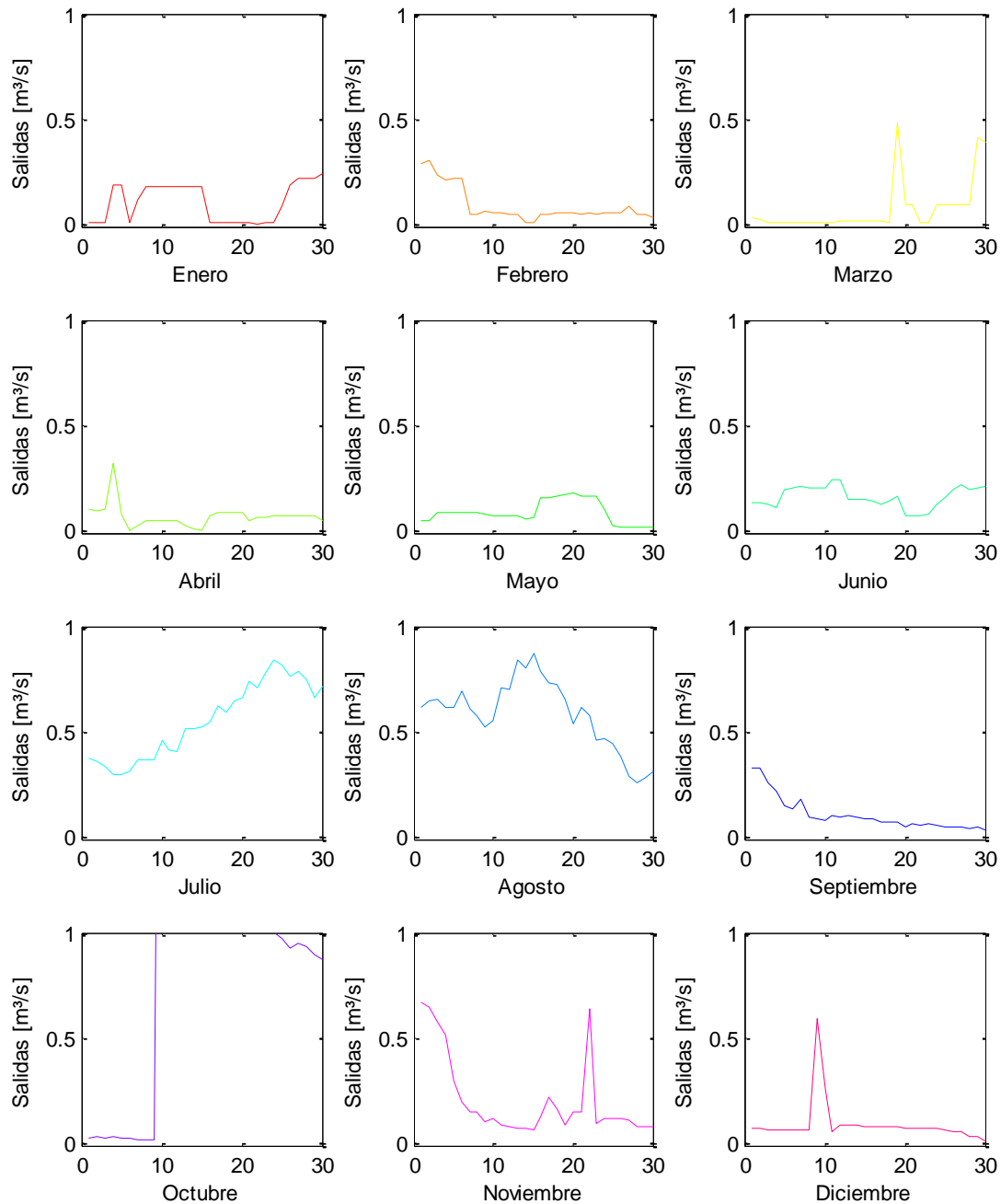


Figura 65: Promedio diario de las extracciones por meses para la serie 1984-2008.

Tomando las demandas promedio del trimestre mayo-junio-julio y aplicándolas al modelo de simulación, obtenemos la siguiente evolución temporal:

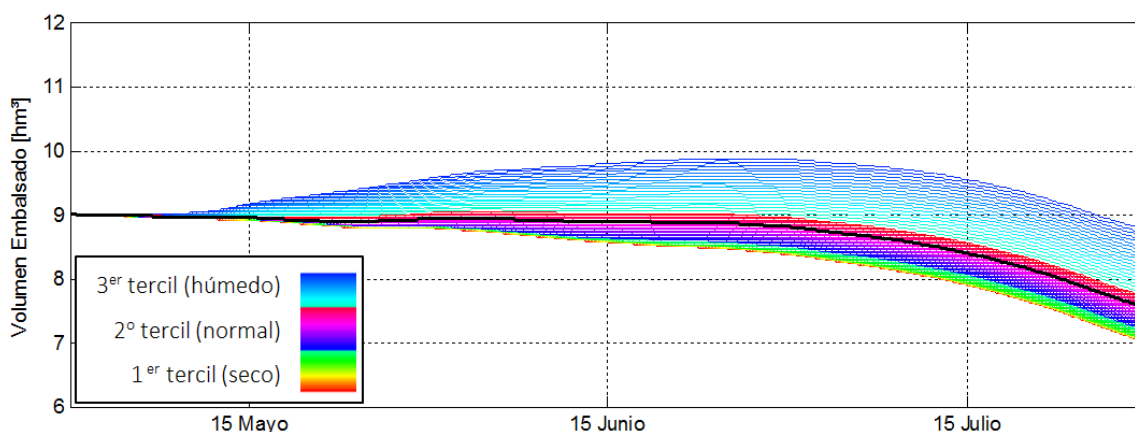


Figura 66: Resultados de la simulación de Monte Carlo en HEC-HMS asumiendo una demanda media.

Es evidente que, como se ha visto en el pluviograma medio anual (Figura 61), la estación lluviosa ha terminado y las demandas de extracción comenzarán a ganar el pulso contra las aportaciones de lluvia, hecho que se aprecia claramente en la Figura 66. Sin embargo, podemos afirmar también que si se mantiene la misma estrategia de repartición de volúmenes de agua a los demandantes, en la ventana trimestral estudiada no existe riesgo de agotar los recursos embalsados.

Se cree conveniente mencionar que los resultados pueden estar del lado de la seguridad en cuanto a riesgo de sequías, por el hecho de que la simulación comienza en un instante concreto (mayo de 2016) sin tener en cuenta las precipitaciones previas, el volumen que ya circula en los cauces de la cuenca, y el flujo subterráneo que puede provenir aún de la primavera lluviosa. En particular, este año 2016 se ha caracterizado por una primavera más bien seca, lo que puede hacer que los resultados se asemejen más a la realidad. En cualquier caso, debe tenerse en cuenta siempre que la simulación no está teniendo en cuenta aportaciones previas a la fecha de inicio de la simulación, pero que debido al retardo por el tiempo de trayecto, sí pueden contribuir al aumento del volumen del embalse.

El análisis final propuesto en la metodología desarrollada en el presente trabajo consiste en observar la dispersión final de resultados y establecer en base a éstos el volumen embalsado más probable. De este modo, podemos recoger la serie de volúmenes finales pronosticados para el último día de julio asumiendo una demanda media, y obtener así la función de probabilidad acumulada y el histograma de frecuencia asociado (Figura 67):

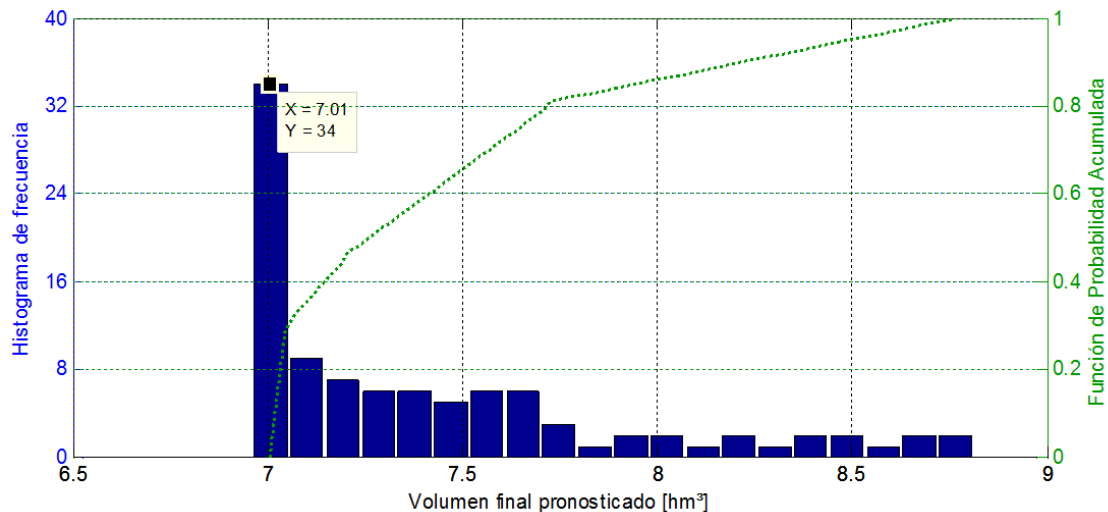


Figura 67: Función de probabilidad acumulada e histograma de frecuencias asociados al volumen final pronosticado para el 1 de agosto tras simulaciones de Monte Carlo.

Del gráfico anterior es fácil notar que, una vez realizadas todas las simulaciones, el resultado más repetido es un volumen final de 7.01 hm³, que por ser la moda de la distribución, corresponde al valor más probable. De este modo ha conseguido reducirse la incertidumbre inicial, puesto que se partía de distribuciones uniformes de probabilidad de lluvia por cada escenario.

Se concluye que no existe riesgo de escasez de recursos para el embalse de Siurana en el próximo trimestre, siendo esperable un volumen embalsado de 7.01 hm³ a primero de agosto, que corresponde al 58% de la capacidad del embalse.

Una importante función de la previsión podría haberse utilizado en el caso en que la predicción revelara una escasez de agua para la ventana temporal. En dicho caso, el operador del embalse sería capaz de aplicar restricciones a la demanda de forma anticipada, penalizando ciertos usos de modo que se garantice la disponibilidad. Esta estrategia de gestión podría ser realizada con el mismo modelo hidrológico, estableciendo distintos escenarios de demanda según las restricciones que se pretenden establecer. La determinación de esta estrategia puede ser fruto de la prueba y error estableciendo en cada iteración una nueva función de la demanda, o bien podría implementarse un módulo que optimizara directamente las restricciones a aplicar y ofreciera al operador las estrategias de penalización y cortes de suministro más efectivas y menos comprometedoras. En dicho caso, se trataría de un modelo de optimización y no de simulación pura, pues incorporaría criterios internos para determinar por sí mismo las operaciones a realizar.

10.4 Validación de la previsión

Una vez establecida una cuantificación del volumen disponible a partir de una previsión cualitativa mediante la metodología aquí propuesta y desarrollada, se ha creído conveniente proceder a su validación una vez transcurrido el primer mes de la simulación.

Así, tras simular la respuesta del embalse para los meses de mayo, junio y julio, una vez finalizado mayo podemos consultar cuál es el estado real del embalse y compararlo con el valor pronosticado por el modelo. De este modo podemos evaluar la bondad de la primera simulación, y ajustarla en base a las nuevas observaciones para mejorar el pronóstico del siguiente mes.

Si esto se hace de manera sucesiva, gradualmente se afinará la previsión de lluvia, puesto que conoceremos qué escenarios del total generado se adecúan más a los sucesos reales. El objetivo es por lo tanto cuantificar cada vez más ajustadamente qué implica la previsión estacional de lluvia, esto es, verificar si el tercil de lluvia indicado por AEMET como el más probable es verdaderamente el tercil que se está dando en la realidad, y una vez verificado (o corregido), encontrar cuál de los escenarios comprendidos en dicho tercil es el que en realidad está ocurriendo.

Además, realizando esta tarea al inicio del nuevo mes, se poseerá también la predicción estacional del tercer mes consecutivo, por lo que simultáneamente se añadirá una previsión estacional del tercer mes, a la vez que se mejorará la bondad del ajuste para los dos meses venideros.

Como se ha comentado, para ilustrar esta propuesta de metodología se ha realizado, una vez vencido mayo de 2016, la comprobación del estado real del embalse, contrastándolo con el pronóstico obtenido para dicho mes. Una vez mayo ha llegado a su fin, podemos revisar el nivel del embalse de Siurana a través del mencionado portal web www.embalses.net. La evolución durante este mes ha sido la siguiente:

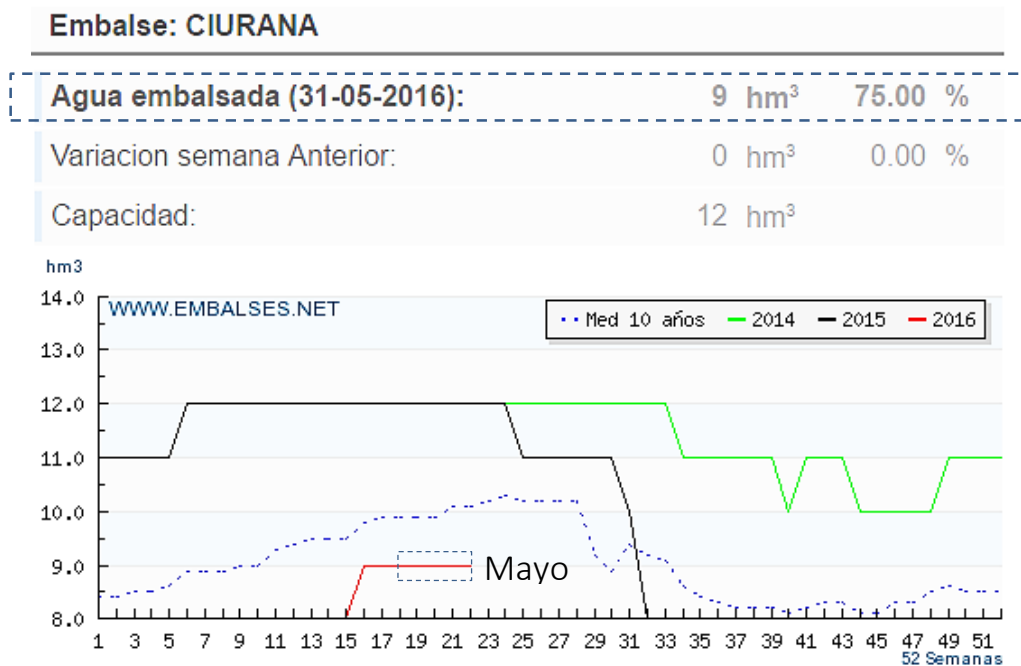


Figura 68: Evolución del volumen embalsado en Siurana. www.embalses.net.

El agua embalsada a 31 de mayo de 2016 representa un volumen de 9 hm³. La exactitud de este valor es cuestionable, dado que el portal sólo facilita datos enteros, pero proporciona una noción realista del estado del embalse.

Este valor debe compararse entonces con los resultados estocásticos del modelo para la misma fecha. A continuación se muestra la función de probabilidad acumulada y el histograma de frecuencia de resultados para el volumen almacenado una vez acabado el mes de mayo.

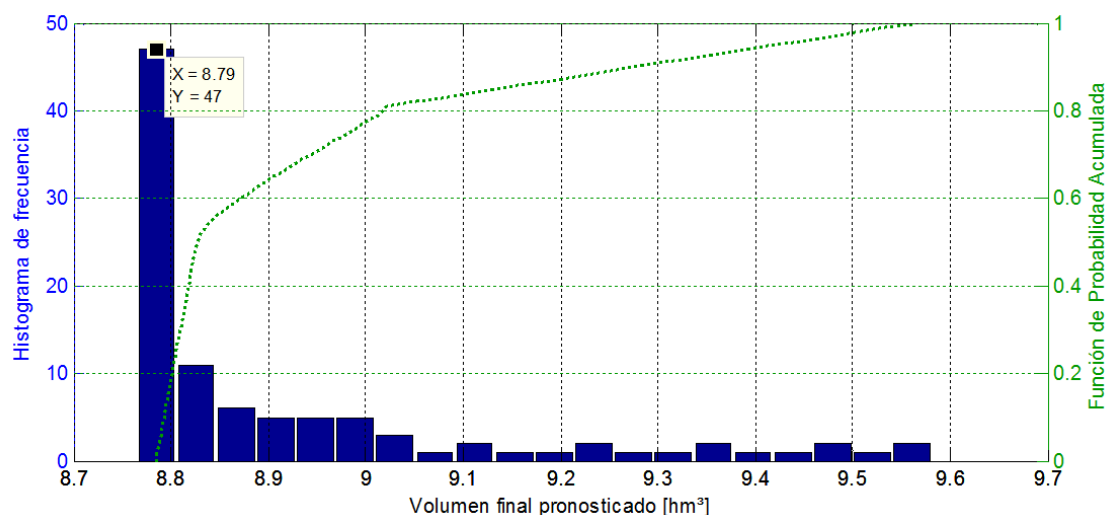


Figura 69: Función de probabilidad acumulada e histograma de frecuencia asociados al volumen final pronosticado para el 31 de mayo tras las simulaciones de Monte Carlo.

Siguiendo el criterio de tomar la moda como el valor más probable, el modelo de simulación hidrológica ha previsto para el 31 de mayo un volumen embalsado de 8.79 hm^3 , frente a los 9 hm^3 reales. En términos relativos, de mayor relevancia, el modelo predice al acabar mayo un volumen igual al 73% de la capacidad total, cuando el resultado real es del 75%.

Dadas las condiciones de incertidumbre mencionadas durante el completo trabajo, el resultado de esta validación sobre la previsión se considera excelente. En general se puede decir que se trata de un modelo robusto, pues si bien la moda no se sitúa sobre el valor real (de dudosa exactitud), el conjunto de los escenarios presenta una muy baja dispersión, con un error relativo inferior al 7% para el dato más alejado. Sin embargo, se debe ser cauteloso a la hora de dar completa credibilidad al modelo, pues éste debería ser validado y corregido sucesivas veces hasta poder estar seguros de su fiabilidad. Podemos en todo caso afirmar que, dado el margen de tiempo para desarrollar el presente trabajo, la única validación que ha sido posible llevar a cabo ha ofrecido unos muy buenos resultados.

10.5 Actualización de la previsión

Una vez validado el modelo para el primer mes de previsión, es posible incorporar los datos reales y las conclusiones observadas para mejorar la previsión de los meses siguientes.

Primero se ha identificado el escenario que ha coincidido con el valor real observado, 9 hm^3 . Éste corresponde a una lluvia trimestral de 108.82mm, tras haber multiplicado la lluvia trimestral media (95mm) por un factor de 1.145. La metodología aquí desarrollada propone asumir entonces que el escenario que mejor representa la realidad actual es el escenario medio afectado por un factor multiplicador de 1.145. La cercanía de este factor a la unidad indica una buena representatividad de la pluviometría media trimestral.

Por otro lado, la cantidad de lluvia se sitúa claramente en el tercil medio, al cual la predicción estacional de la AEMET atribuía un 35% de probabilidad de ocurrencia. Esto implica que el mes de mayo se ha situado sobre el segundo tercil más probable según AEMET, por debajo del tercil seco (con un 45% de probabilidad). Los porcentajes, sin embargo, eran bastante similares, lo que indica que no existía una clara convicción por parte de la AEMET con respecto al escenario futuro.

Seguidamente, se ha tomado la previsión estacional de AEMET para los tres meses siguientes, junio, julio y agosto. La interpretación de los datos de AEMET ha sido detallada en el apartado 10.2: *Precipitación Cualitativa de AEMET*. Los porcentajes de probabilidad, sin embargo, no han cambiado con respecto al mes anterior para el cuadrante Noreste de la península:

PROBABILIDAD DE LA CATEGORÍA MÁS PROBABLE DE PRECIPITACIÓN JUNIO-JULIO-AGOSTO-2016

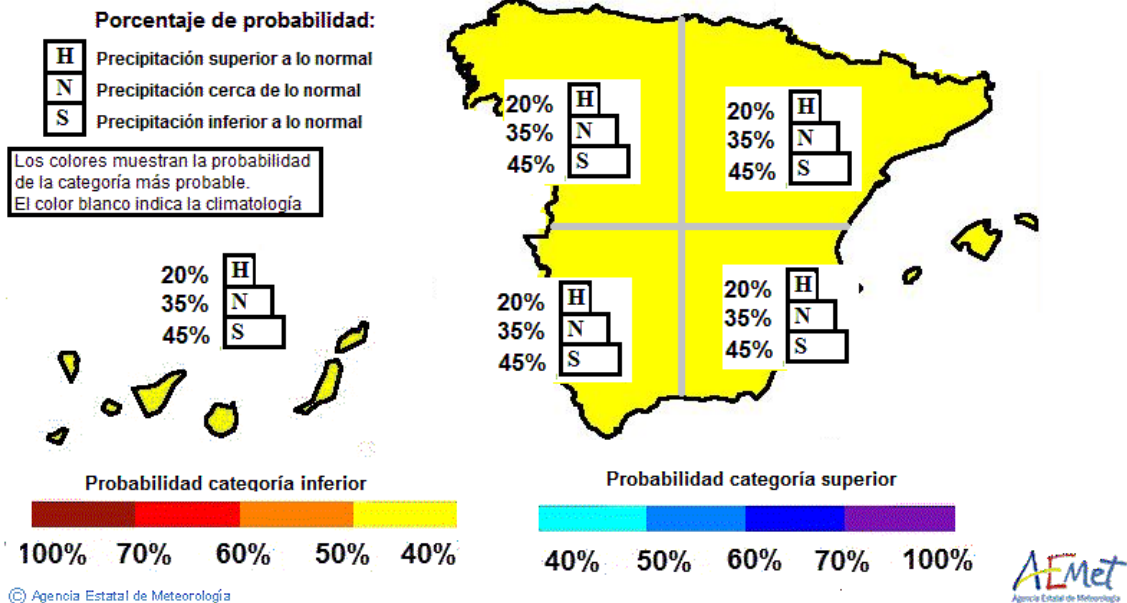


Figura 70: Previsiones de precipitación para el trimestre junio-julio-agosto de 2016. AEMET (2016).

De forma análoga a lo descrito en el apartado 10.3: *Cuantificación de una Previsión Cualitativa*, se han elaborado 100 nuevos escenarios fraccionados en 3 terciles según las probabilidades de AEMET. Sin embargo, para esta actualización de la previsión se cuenta con un dato nuevo que inicialmente no se poseía: una vez validado el mes anterior, se conoce que el escenario que más se ajusta a la realidad de entre todos los simulados es aquél correspondiente al 114.5% del valor de lluvia media. Sabiendo que la lluvia media acumulada para el trimestre junio-julio-agosto es de 62.27mm, el escenario de preferencia será $1.145 \times 62.27\text{mm} = 71.33\text{mm}$.

Esta valiosa información puede ser utilizada para generar los escenarios de la nueva simulación. Los terciles superior e inferior seguirán una distribución uniformemente aleatoria en cuanto a la lluvia, pero para el tercil medio se pretende dar más peso al valor que mejor ha ajustado la realidad el mes pasado. La propuesta del presente trabajo consiste en asignar una distribución de probabilidad lineal a tramos: al valor considerado como más realista se le aplica una probabilidad un 50% superior a la propuesta por AEMET, mientras que a los extremos del tercil que contiene dicho valor se les aplica una reducción del 50% de probabilidad. De este modo se conserva la probabilidad total propuesta por AEMET, mientras que se le asigna más probabilidad de ocurrencia a los valores cercanos al observado como más ajustado.

De esta forma se han generado los nuevos 100 escenarios, sobre la base de las precipitaciones medias mensuales de la Figura 59 y las demandas del recurso de la Figura 65 para los nuevos meses de estudio. Los escenarios de precipitación resultan:

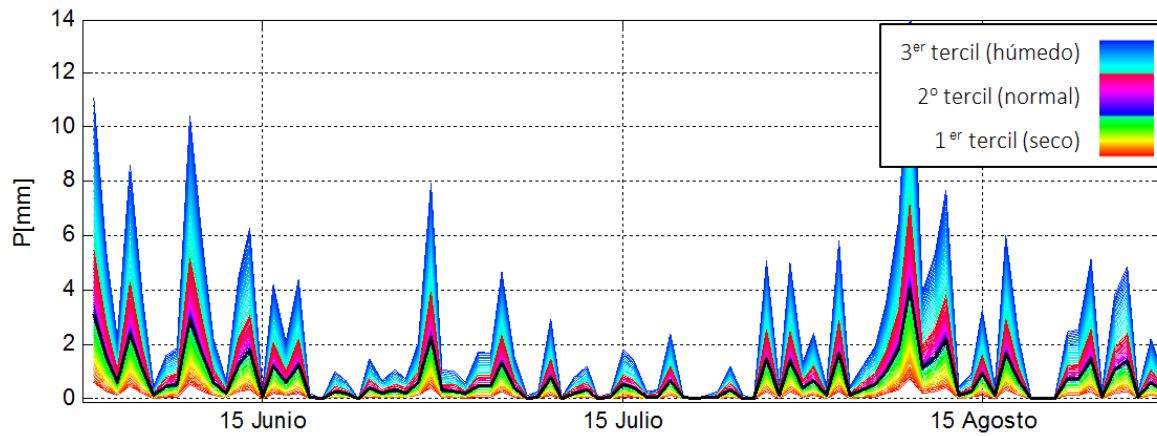


Figura 71: Escenarios de precipitación en base a AEMET para el trimestre junio-julio-agosto de 2016, actualizados con la validación del mes de mayo. Precipitación diaria.

Realizando una nueva simulación de Monte Carlo con cada uno de los escenarios anteriores, y aplicando una reducción del volumen en función de la demanda media se obtiene la respuesta estocástica siguiente para el volumen acumulado:

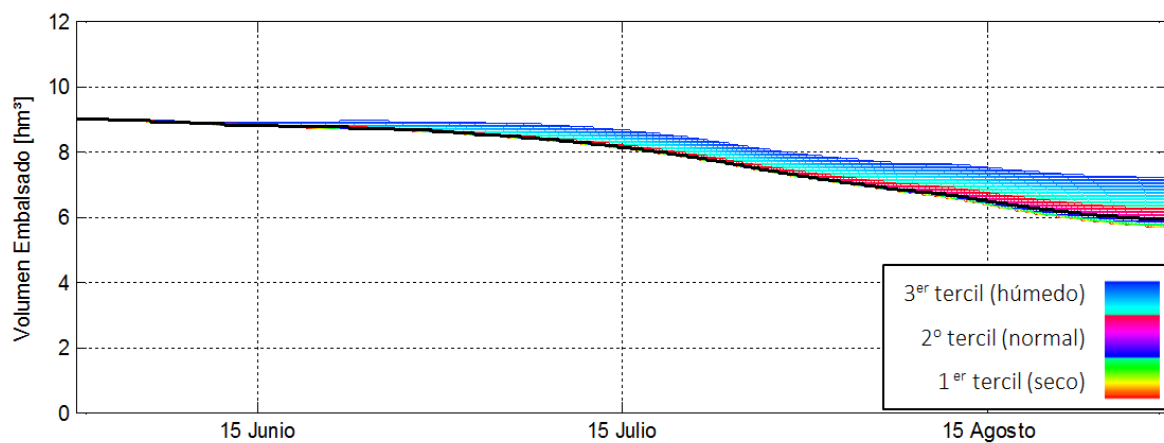


Figura 72: Resultados de las simulaciones de Monte Carlo en HEC-HMS, actualizadas con la validación del mes de mayo.

De este modo se actualiza la previsión inicialmente realizada para el último día de julio:

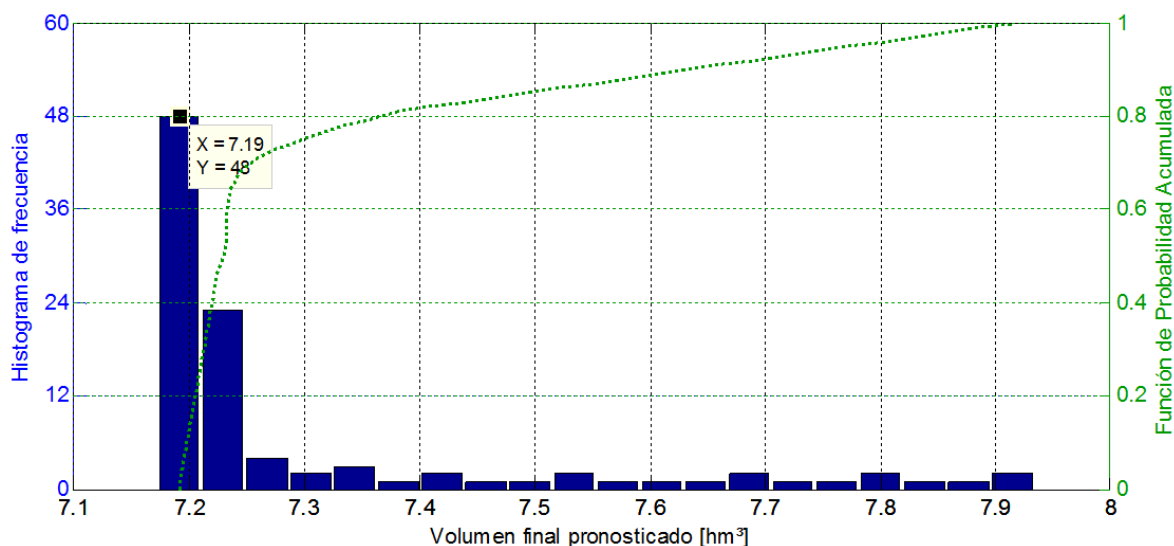


Figura 73: Función de probabilidad acumulada e histograma de frecuencias asociados al volumen final pronosticado para el 31 de julio, actualizados con la validación del mes de mayo.

Encontramos que la previsión actualizada pronostica un volumen final en julio de 7.19 hm^3 , algo superior a los 7.01 hm^3 obtenidos en la primera simulación. Puede observarse la robustez del modelo y la reducción en la dispersión de resultados, encontrando ahora una probabilidad asociada a la moda del 48%, frente al 34% de la primera aproximación. Se actualiza así la previsión anterior, concluyendo que no existe riesgo de sequía a primeros de agosto de 2016 en el pantano de Siurana, siendo esperable que éste se encuentre entonces al 60% de su capacidad embalsable.

Por otro lado, la inclusión del tercer mes de predicción estacional de AEMET permite establecer la primera simulación para el fin de agosto:

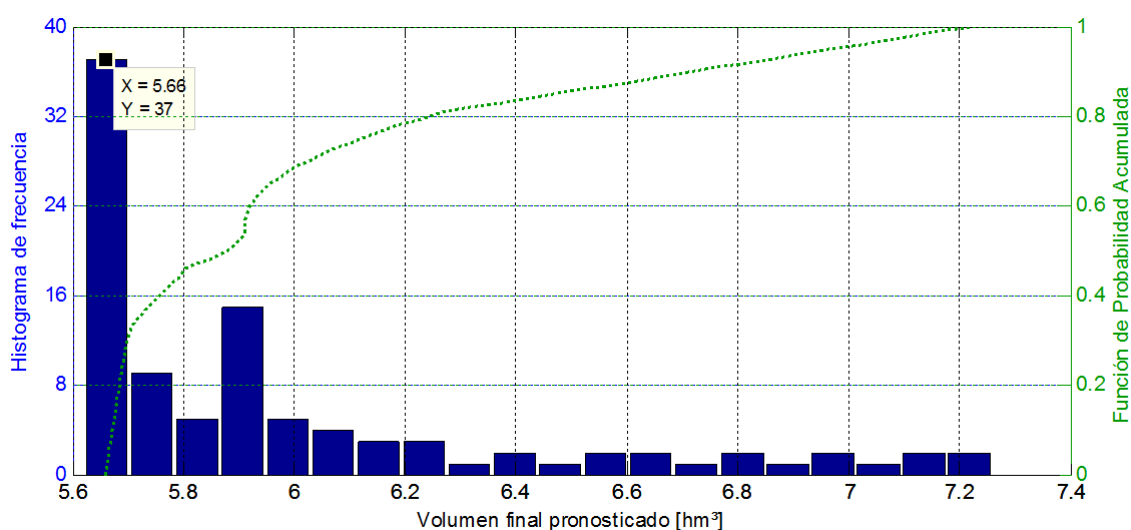


Figura 74: Función de probabilidad acumulada e histograma de frecuencias asociados al volumen final pronosticado para el 31 de agosto.

Se concluye pues que es esperable que, bajo condiciones de demanda media, el volumen total acumulado en el embalse de Siurana para el fin de agosto será de 5.66 hm^3 , correspondiente al 47% de su capacidad total. No es esperable pues que exista riesgo de escasez de recurso para la ventana temporal simulada.

Finaliza así la ejemplificación de la propuesta metodológica para desarrollar pronósticos cuantitativos sobre la base de la predicción estacional de AEMET, aplicada y validada en estas páginas para el embalse de Siurana.

11. Propuesta de un procedimiento

Con el propósito de recoger, sintetizar y sistematizar la metodología propuesta en este trabajo, se resume a continuación el procedimiento de concepción, uso y actualización del modelo hidrológico desarrollado:

FASE INICIAL

- 1) Desarrollo del modelo:
 - a) Estudio previo de condicionantes de la cuenca;
 - b) Establecimiento de los procesos a modelar;
 - c) Toma y procesado de datos de entrada al modelo;
 - d) MDE y tratamiento topográfico de la cuenca;
 - e) Desarrollo hidrológico, Calibración y Validación del modelo;

FASE DE EXPLOTACIÓN

- 1) Simulación estocástica inicial (al inicio del mes 0):
 - a) Definición de escenarios según la Previsión Estacional de AEMET y demanda;
 - b) Desarrollo de las simulaciones para 3 meses;
 - c) Análisis de resultados y establecimiento de estrategias de gestión.
- 2) Actualización de los escenarios de lluvia (al inicio del mes "i"):
 - a) Comparación del resultado del mes "i-1" con la observación real;
 - b) Definición del escenario más ajustado a la realidad;
 - c) Actualización de los escenarios en base a AEMET y la verificación mensual;
- 3) Simulación estocástica actualizada (al inicio del mes "i"):
 - a) Desarrollo de las simulaciones para 3 meses siguientes;
 - b) Análisis de resultados y establecimiento de estrategias de gestión;
 - c) Vuelta al punto 2) una vez transcurrido el mes "i".

El procedimiento se muestra en forma de mapa conceptual en la Figura 75:

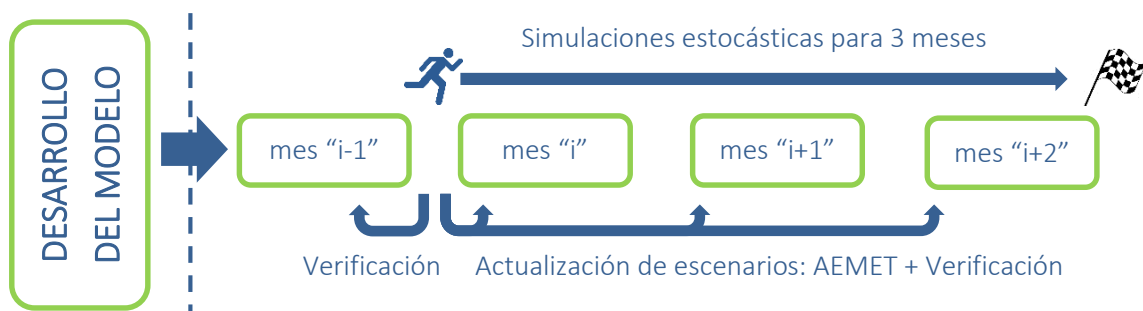


Figura 75: Mapa conceptual del procedimiento establecido en el presente trabajo.

El esquema interno del modelo a desarrollar se ha mostrado ya en la Figura 37.

12. Futuras líneas de mejora

Al finalizar esta primera propuesta de modelo hidrológico para el soporte a la toma de decisiones, se ha querido recoger en este apartado una síntesis de las ideas de mejora que durante el desarrollo del trabajo se han señalado, pero por los condicionantes evidentes del proyecto se ha optado finalmente por no incluirlos en el modelo. También se recogen aquellos ámbitos de la modelación hidrológica que están aún en fase de investigación, desarrollo o mejora, de modo que sirva como guía para futuras intervenciones en esta materia, sobre la cual queda aún mucho por decir.

12.1 Concepción y el desarrollo del modelo

Los puntos de interés a desarrollar se proponen a continuación:

- La calidad de los datos de entrada para el caso del presente trabajo dista de lo que hubiera sido deseable para el desarrollo de un modelo, pese a que constituye una fuente de por sí muy valiosa y pocas veces disponible. En el ámbito espacial, la estación pluviométrica tomada (Cornudella) está alejada de la zona más abrupta de la cuenca (montañas de Prades), lo que puede haber provocado una subestimación de la lluvia en el proceso de calibración. Debería valorarse la mejor instrumentación de la cuenca, principalmente con nuevos pluviómetros localizados estratégicamente donde se espera variabilidad espacial de la lluvia.
- En cuanto al ámbito temporal, la frecuencia de muestreo diaria tampoco se considera adecuada para captar de modo suficiente la variabilidad de la lluvia. De acuerdo a Xie (2005), cuanto más pequeña sea la cuenca, más frecuente deberá ser la renovación de los datos, siendo convenientemente inferior a lecturas diarias. La frecuencia de renovación del nivel del embalse sí se considera adecuada.
- Las series de lluvia de Cornudella no estaban completas desde un inicio, por lo que se optó por un procedimiento de extrapolación en base a las otras 3 estaciones meteorológicas de la zona. Pese a que se confía en la representatividad de la extrapolación, como se desarrolla en el apartado 7.1.2: *Pluviometría*, se trata nuevamente de una fuente de incertidumbre contra la que deben establecerse importantes esfuerzos, al consistir en la información de entrada más básica e importante.
- La frecuencia de muestreo del caudal tampoco se considera satisfactoria para ajustar correctamente las componentes de escorrentía superficial y subterránea. Un valor diario procedente de una estimación a partir del nivel del agua no caracteriza suficientemente el pico del hidrograma ni el momento de cese de la escorrentía

superficial para dar paso a únicamente el flujo base, lo cual dificulta la calibración de los parámetros relacionados.

- La conceptualización de la escorrentía presenta algunas limitaciones. El agua infiltrada en la parte alta de la cuenca puede manar a la superficie debido a una saturación puntual o una baja transmisividad de los estratos inferiores. Estos intercambios no son normalmente considerados y pueden acelerar la respuesta del hidrograma. Se cree que este factor no afectará significativamente a un modelo de aportaciones a medio-largo plazo, pero es un proceso que actualmente carece de representación en los modelos hidrológicos que se conocen.
- La saturación del estrato superficial se ha considerado originada solamente por efecto de la lluvia. El flujo infiltrado al subsuelo es transferido al modelo subterráneo de depósitos lineales, careciendo desde ese momento de interacciones con la superficie, cuando por los motivos del punto anterior el flujo subsuperficial puede producir saturación del subsuelo de las sub-cuencas más bajas e incluso re-evaporarse. Este proceso sí puede afectar al volumen total aportado, por lo que se ha creído conveniente incluir la presente reflexión.
- Los eventos de escorrentía son altamente dependientes del relieve localizado y la distribución espacial de la lluvia, lo que conlleva a una no linealidad real en la respuesta de la cuenca. En este sentido, la división de una cuenca en subcuencas de propiedades supuestamente uniformes no consiste en la opción más adecuada. La propia definición de una cuenca hidrográfica conlleva la coexistencia de unos límites elevados y abruptos con el punto de salida de la cuenca, típicamente más llano. Una división en términos de parámetros orográficos resultaría más efectiva.
- La conceptualización de la evapotranspiración, por su lado, no ha considerado la estacionalidad de la cobertura vegetal. El coeficiente de sequía $C=1.26$ asignado para climas no áridos en base a Priestly & Taylor (1972) debería ser revisado y, si fuera posible, contrastado con datos reales para una mejor caracterización. La ascensión por capilaridad nunca es considerada en los modelos hidrológicos.
- En los elementos de transmisión del hidrograma entre cuencas, las características geométricas e hidráulicas del cauce se consideran constantes. Sin embargo, la forma en sección es un producto de las crecidas que pasan a través de ella, y las características hidráulicas, principalmente la velocidad del flujo, dependen del propio hidrograma tanto espacial como temporalmente.
- Se ha observado una polarización en la validación del modelo. Sería interesante calibrar el modelo discriminando dichos periodos para observar cuáles son las diferencias que originan el comportamiento distinto, con el fin de poder utilizar una u otra versión dependiendo de las condiciones particulares del momento en que se utilice.

12.2 Modelo predictivo de cuantificación estacional

- El conocimiento exacto de la demanda, o bien una estimación aproximada en función de las concesiones actualizadas y los planes de gestión del recurso ayudarían a reducir la incertidumbre sobre el volumen pronosticado para la ventana de simulación.
- En caso de desconocimiento de la demanda, la metodología propuesta consistente en tomar las demandas medias históricas podría ser mejorada, estableciendo una función que mayor los valores de extracción para los escenarios de mayor sequía, y la disminuya cuando abunde el agua de precipitación, como es esperable en la realidad.
- La estrategia tomada para la actualización de los escenarios de lluvia en base a las observaciones del mes anterior es una propuesta simple que admite un amplio margen de mejora. La distribución lineal puede ser modificada de modo que acentúe o disminuya su influencia en función de la cercanía del nuevo valor esperado con respecto a la moda de la distribución original. Su forma puede ser parametrizada de forma que sea derivable y continua con los terciles de probabilidad adyacentes de modo que adquiera mayor sentido físico.
- Al realizar las simulaciones de Monte Carlo, se debería incorporar un periodo previo de puesta en régimen para que las capas superficiales y subsuperficiales adquieran un contenido en humedad realista. De no ser así, se estará subestimando la entrada de agua al embalse, pues las nuevas simulaciones no tendrán en cuenta el flujo base ya presente.
- Se considera importante invertir esfuerzos en formar e informar a los organismos gestores en materia de modelización hídrica, para que aumente su confianza en ella teniendo siempre en cuenta sus limitaciones. La comprensión de las potencialidades mencionadas en el trabajo puede conducir a una forma global de gestión hídrica mucho más eficiente con respecto a todos los agentes interventores. Es necesario también que la modelación hídrica sea presentada de forma sencilla y permitiendo una fácil comprensión e interacción usuario-modelo.
- Como se ha comentado en el apartado 3.3: *Herramientas SAD*, nuevos esfuerzos se están depositando en implementar sistemas de inteligencia artificial mediante redes neuronales que continuamente registren condiciones, decisiones y consecuencias para un aprendizaje autónomo.
- La distribución en cascada de las rutinas internas del modelo propuesto permite el ensamblaje de nuevos modelos para incrementar las funciones del programa, dándole un carácter integrador además de las funciones primarias propuestas. Así, la herramienta puede someterse a constante evolución e innovación, adaptándose a futuras nuevas necesidades conforme se planteen y pudiendo llegar a crear una marca de referencia en el sector de la gestión hídrica. Se mencionan a continuación algunas de las potencialidades de desarrollo del modelo:

- Predicción de cortes en la captación de agua por exceso de turbidez, salinidad o contaminación, para una mejor previsión y gestión de los recursos hídricos supletorios.
- Control de aprovechamientos hidroeléctricos.
- Erosión, transporte de sedimentos y contaminantes aguas abajo de la presa.
- Riesgo de inundabilidad de zonas próximas al embalse o al río.
- Capacidad de tratamiento en la gestión de ETAPs y EDARs.
- Estudio de saturación de redes de alcantarillado. Gestión de depósitos pluviales.

13. Conclusiones

Se ha reservado este apartado para subrayar las nociones más importantes y aportar los comentarios finales al presente trabajo.

En primer lugar, se recapitula que la intención del trabajo ha sido elaborar un primer documento que describa las potencialidades y la metodología de desarrollo de un modelo hidrológico que sirva como herramienta de apoyo para la toma de decisiones. La novedosa metodología desarrollada y presentada para cuantificar la predicción estacional de AEMET, de carácter inicialmente cualitativo, y el procedimiento iterativo de ajuste que permite su progresivo afino en el tiempo son las aportaciones principales del trabajo y resultan claves para justificar la utilidad del proyecto.

La dificultad principal de toda modelación hidrológica es con diferencia la adquisición de datos en cantidad y de calidad suficientes. Una correcta modelación hidrológica debería considerar no menos de 20 años de datos con una frecuencia de muestreo deseable inferior a la diaria; sin embargo, dado que el nacimiento de la modelación es todavía reciente, existe una falta de datos en la actualidad que no puede ser paliada. Cuanto antes se invierta en los medios de instrumentación necesarios, antes se estará en posesión de los datos necesarios para desarrollar de modo óptimo cualquier modelación.

Por otro lado, las previsiones meteorológicas cuantitativas actuales sólo satisfacen las necesidades de los sistemas de alerta temprana, que requieren de pronósticos a muy corto plazo. La incertidumbre de las previsiones a largo plazo es sin duda otro de los factores que más limitan actualmente la confianza en los modelos hidrológicos. La respuesta ante una elevada incertidumbre es, de acuerdo a Hillel (1986), la tendencia a modelos más simples y minimización de sus parámetros. En la medida en que las demás ramas de la ciencia avancen y reduzcan la incertidumbre, se podrán incorporar nuevas descripciones de procesos que seremos capaces de caracterizar correctamente.

La modelación hidrológica como herramienta SAD resultará un punto estratégico y enormemente atractivo para el desarrollo de la gestión integrada de recursos hídricos. Si se desea estar a la altura de las necesidades de las próximas décadas, será necesario comenzar lo antes posible a desarrollar dichos modelos y, sobre todo, a recopilar datos e invertir en nuevas redes de instrumentación.

En cuanto al caso práctico desarrollado, se ha demostrado que con pocos medios y de bajo coste es posible obtener unos resultados altamente satisfactorios, hasta donde se ha podido validar. Se trata de un modelo robusto que ha pronosticado a un mes vista el estado final del embalse de Siurana, obteniendo unas reservas del 73% frente al 75% real observado. El método

estocástico utilizado mediante simulaciones de Monte Carlo basadas en la predicción estacional de AEMET, junto con el progresivo afino mensual propuesto, proporciona mucha más información y confianza que un simple modelo determinista del que sólo es posible extraer un único dato. Los resultados de la herramienta SAD propuesta están dados en términos probabilísticos, por lo que el operario adquiere una sensibilidad mucho mayor acerca de la realidad. Todo ello supone también un gran avance con respecto a los métodos actuales de gestión mediante indicadores de estado.

La propuesta de herramienta se contrapone a los procedimientos actuales de gestión de embalses, que frecuentemente responden a calibraciones históricas desconectadas de los procesos hidrológicos reales, y cuya incertidumbre puede conducir a una gestión excesivamente conservadora. Los puntos de valor añadido más notables frente al sistema convencional de gestión por indicadores son:

- Se obtiene una mayor aplicabilidad a gran escala con respecto a los métodos convencionales, puesto que se puede emplear el mismo procedimiento sobre cualquier cuenca de interés.
- La calidad de los datos de entrada es mucho mayor (datos reales frente a indicadores estadísticos) y su tratamiento se realiza de manera coherente con las leyes físicas.
- La resolución temporal del método es mucho menor (segundos frente a meses), dado que se admiten actualizaciones a tiempo real, o bien previsiones meteorológicas con un paso de tiempo tan reducido como se desee.
- El tiempo de antelación con respecto a la ocurrencia real del evento puede aprovecharse para la operación de estructuras hidráulicas que contribuyan a la regulación del riesgo detectado, pudiendo simular distintos escenarios y rectificaciones hasta definir el plan de gestión más apropiado.
- Por otro lado, ante un riesgo inminente no previsto con antelación, puede ser de gran utilidad para adoptar un criterio sólido en la toma de decisiones para hallar la solución que mejor sortee la amenaza.
- Facilita el seguimiento de la evolución de las sequías, de las medidas tomadas y sus consecuencias, el control de las dotaciones y caudales en las tomas, así como verificar el cumplimiento de los caudales ecológicos requeridos. Se evitarán así restricciones en el consumo de agua cuando no sea estrictamente necesario.
- Se evita el desembalse preventivo para garantizar la laminación cuando las previsiones no consideren riesgo real de avenidas. En caso de riesgo, el desembalse será mucho más ajustado al riesgo del hidrograma de entrada esperado.

Es sabido que el conocimiento sobre la realidad nunca será completo, ni mucho menos correctamente modelado en su totalidad. Es tarea del modelador el aceptar y comunicar al

operador que siempre quedará algo en lo impredecible. Por otro lado, deberá también dedicarse esfuerzos en conocer las propias limitaciones del modelo. En este sentido, en el presente trabajo se ha pretendido caracterizar tanto las fuentes de incertidumbre como las propiedades del posible error cometido, encontrando distribuciones probabilísticas (distribución asimétrica de Laplace) que ofrecen una idea de en qué medida puede el modelo estar equivocándose para tener en cuenta dicho factor. Es importante realizar siempre este análisis crítico para conocer las propias limitaciones e interpretar correctamente los resultados obtenidos.

El presente trabajo no se considera en ningún punto como terminado, pues queda abierto a las futuras líneas de investigación del apartado 12, y a otras propuestas de mejora que pudieran surgir del continuo crecimiento de este tipo de herramientas.

Conviene insistir en que el procedimiento instaurado en el apartado 11 puede ser indistintamente aplicado a cualquier otro embalse sin más que variar los datos a tratar, confiriéndole en consecuencia al presente trabajo un carácter universal dentro de las limitaciones comentadas. El esfuerzo volcado sobre una exhaustiva definición del estado del arte, las bases técnicas implicadas y una completa referenciación responden a la voluntad de que aquél interesado en desarrollar un modelo de aportación encuentre en este trabajo una pequeña guía de aproximación a la materia.

Podrán verse especialmente atraídas las administraciones u organismos que carecen de una capacidad solvente de gestionar una escasez de agua, y no poseen capital suficiente para invertir en infraestructuras hidráulicas o bien desean optimizar su gestión. Un nicho de mercado puede encontrarse, por ejemplo, en países en vías de desarrollo. Hasta donde se ha podido conocer, por el momento no existe una oferta por parte de grandes consultoras que ofrezcan este servicio, puesto que la materia está aún experimentando su fase de iniciación en la curva de desarrollo logística. Así, estamos quizás ante una inestimable oportunidad de negocio para las grandes firmas de consultoría hídrica.

Con todo, ha sido mucho lo aprendido y expuesto en estas páginas. Sirva entonces este trabajo como aporte de esta nueva experiencia a la comunidad, exhortando a continuar en la profundización y aplicación práctica de la modelación hidrológica mientras se acerca su estallido definitivo.

14. Referencias

- AAA (2007). *Plan Especial de actuación en situaciones de alerta y eventual sequía en la cuenca mediterránea andaluza*. Agencia Andaluza del Agua. Consejería de Medio Ambiente. Málaga, Noviembre 2007.
- Abtew, W., & Melesse, A. M. (2012). *Evaporation and evapotranspiration measurements and estimations*. Springer.
- ACA (2002). *Delimitació de zones inundables per a la redacció de l'INUNCAT*. Ministerio de Medio Ambiente – Confederación Hidrográfica del Ebro.
- Alaska State Department of Transportation. (1995). *Alaska highway drainage manual*.
- Almeida, I., Almeida, A., Anache, J., Steffen, J., Alves, T. (2015). Estimation on Time of Concentration of Overland Flow in Watersheds: A Review. *Geociencias*, 33(4), 661–671.
- Anderson, M. G., & Rogers, C. C. M. (1987). Catchment scale distributed hydrological models: a discussion of research directions. *Progress in Physical Geography*, 11(1), 28–51.
- Aparicio Mijares, F. J. (1993). *Fundamentos de Hidrología de superficie*. Limsa.
- Artigas Boix, F. O. (2015). *Estudi Sedimentològic de la Conca Aviar amb HEC-HMS*. Universitat Politècnica de Catalunya.
- Becker, A., & Pfuetzner, B. (1990). Larger-scale hydrological modelling for regional transferring of hydrological information. *Proceedings of the Ljubljana Symposium*.
- Beven, K., & O'Connell, P. E. (1982). *On the role of physically-based distributed modelling in hydrology*, (81).
- Bladé, E., Sánchez-truebos, H., Dolz, J. Sánchez-Juny, M. (...) (2014). *Estimación del hidrograma de salida en una cuenca usando un modelo hidrológico distribuido y un modelo hidráulico*. Universitat Politècnica de Catalunya.
- Cabelguenne, M., Debaeke, P., Puech, J., & Bosc, N. (1997). *Real time irrigation management using the EPIC-PHASE model and weather forecasts*. *Agricultural Water Management*, 32(3), 227–238. [http://doi.org/10.1016/S0378-3774\(96\)01275-9](http://doi.org/10.1016/S0378-3774(96)01275-9)
- Cabrera, J. (2012). *Validación de Modelos Hidrológicos*.
- Celeste, A. B., & Billib, M. (2009). Evaluation of stochastic reservoir operation optimization models. *Advances in Water Resources*, 32(9), 1429–1443. <http://doi.org/10.1016/j.advwatres.2009.06.008>

- Center, H. E. (1967). *Generalized Standard Project Rain flood Criteria Southern California Coastal Streams*.
- Cheng, W.-C., Putti, M., Kendall, D. R., & Yeh, W. W.-G. (2011). A real-time groundwater management model using data assimilation. *Water Resources Research*, 47(6), W06528. <http://doi.org/10.1029/2010WR009770>
- Chow, V. Te. (1962). Hydrologic determination of waterway areas for the design of drainage structures in small drainage basins. University of Illinois at Urbana Champaign, College of Engineering. Engineering Experiment Station.
- Chow, V. T., & Saldarriaga, J. G. (1994). *Hidrología aplicada*. McGraw-Hill.
- Clark, C. O. (1945). Storage and the Unit Hydrograph. *ASCE Trans*.
- Crawford, N. H., & Linsley, R. K. (1966). Digital simulation in hydrology: Stanford Watershed Model IV. *Contemporary Hydrology*, 157–158.
- Davis, P. A., Olague, N. E., & Goodrich, M. T. (1991). Approaches for the validation of models used for performance assessment of high-level nuclear waste repositories.
- Diéguez, J.M. (2009). Condicionantes en la explotación ordinaria de los embalses gestionados por la Agencia Catalana del Agua. *Ingeniería del Agua*, Vol. 16, Nº 4.
- Domínguez Mora, R., Esquivel Garduño, G., Méndez Antonio, B., Mendoza Reséndi, A., Arganis Juárez, M. L., & Carrizosa Elizond, E. (2008). *Manual del Modelo para pronóstico de escurrimiento*. Retrieved from http://eias.utalca.cl/isi/publicaciones/unam/pronostico_del_escurrecimiento.pdf
- Domínguez, M. R., Esquivel, G. G., Méndez, A. B., Mendoza, R. A., Arganis, J. M. L., & Carrizosa, E. E. (2008). *Manual del Modelo para pronóstico de escurrimiento*. Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México.
- Dooge, J. C. I. (1959). A general theory of the unit hydrograph. *Journal of Geophysical Research*. <http://doi.org/10.1029/JZ064i002p00241>
- Dueñas, C. (1997). *Marco normativo vigente ante el riesgo de inundaciones*. Madrid.
- Dunne, T., & Leopold, L. (1978). *Water in environmental planning*. Retrieved from <http://library.wur.nl/WebQuery/clc/116120>
- DWC (2013). Statewide Groundwater Recommendations, 8.B. *California Groundwater Plan 2013*.

- Fang, X., Thompson, D. B., Cleveland, T. G., Pradhan, P., & Malla, R. (2008). Time of Concentration Estimated Using Watershed Parameters Determined by Automated and Manual Methods. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 134(April), 202–211. [http://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9437\(2008\)134:2\(202\)](http://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(2008)134:2(202))
- Francés García, F., & Benito Casado, J. (1995). La modelación distribuida con pocos parámetros de las crecidas. *Ingeniería Del Agua*, 2(4). <http://doi.org/10.4995/ia.1995.2684>
- Freeze, R. A., & Cherry, J. A. (1979). *Groundwater*. Prentice-Hall. Retrieved from <https://books.google.es/books?id=feVOAAAAMAAJ>
- Geprgakakos, A.P., et Al. (2011). Value of adaptative water resources management in northern California under climatic variability and change : reservoir management. *Journal of Hydrology*.
- Geta, J. A. L., & Hernández, L. R. (2010). *Desarrollo Sostenible, Uso Conjunto Y Gestion Integral de Recursos Hídricos*. Retrieved from: <http://books.google.com/books?id=4QeQeQr5S3cC&pgis=1>
- Gil Olcina, A., & Morales Gil, A. (2001). *Causas y consecuencias de las sequías en España*. Caja de Ahorros del Mediterráneo.
- Grayson, R. B., Moore, I. D., & McMahon, T. A. (1992). Physically based hydrologic modeling: 2. Is the concept realistic? *Water Resources Research*, 28(10), 2659–2666. <http://doi.org/10.1029/92WR01259>
- Harou, J. J., Medellín-Azuara, J., Zhu, T., Tanaka, S. K., Lund, J. R., Stine, S., ... Jenkins, M. W. (2010). Economic consequences of optimized water management for a prolonged, severe drought in California. *Water Resources Research*. <http://doi.org/10.1029/2008WR007681>
- Hejazi, M. I., & Cai, X. (2011). Building more realistic reservoir optimization models using data mining - A case study of Shelbyville Reservoir. *Advances in Water Resources*. <http://doi.org/10.1016/j.advwatres.2011.03.001>
- Hejazi, M. I., Cai, X., & Ruddell, B. L. (2008). The role of hydrologic information in reservoir operation – Learning from historical releases. *Advances in Water Resources*, 31(12), 1636–1650. <http://doi.org/10.1016/j.advwatres.2008.07.013>
- Hillel, D. (1987). *Future developments in soil science research*.
- Hoggan, D. H. (1997). *Computer-assisted floodplain hydrology and hydraulics*. McGraw-Hill.
- Horton, R. E. (1933). The Rôle of infiltration in the hydrologic cycle. *Transactions, American Geophysical Union*, 14(1), 446. <http://doi.org/10.1029/TR014i001p00446>
- Howard, T. (1993). *Development and application of a continuous SMA algorithm for the HEC-HMS*. (U. of Washington, Ed.).

- Hundley, N. (2001). *The great thirst: Californians and water*. University of California Press, Berkeley.
- Kirpich, Z. P. (1940). Time of Concentration of Small Agricultural Watersheds.
- Klemes, V. (2014). The improbable probabilities of extreme floods and droughts. In *Hydrology of Disasters: Proceedings of the World Meteorological Organization Technical Conference Held in Geneva, November 1988* (p. 43).
- Klemes, V. (1986). Operational testing of hydrological simulation models. *Hydrological Sciences Journal*, 31(1), 13–24. <http://doi.org/10.1080/02626668609491024>
- Ko, I. H. (2008). Development of DSS Technology for IWRM River Basin Approach in Korea.
- Kottek, M., Grieser, J., Beck, C., Rudolf, B., & Rubel, F. (2006). World map of the Köppen-Geiger climate classification updated. *Meteorologische Zeitschrift*, 15(3), 259–263. <http://doi.org/10.1127/0941-2948/2006/0130>
- Kundzewicz, Z. W., & Stakhiv, E. Z. (2010). Are climate models “ready for prime time” in water resources management applications, or is more research needed? *Hydrological Sciences Journal*, 55(7), 1085–1089. <http://doi.org/10.1080/02626667.2010.513211>
- Labadie, J. W. (2004). Optimal Operation of Multireservoir Systems: State-of-the-Art Review. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 130(2), 93–111. [http://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9496\(2004\)130:2\(93\)](http://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9496(2004)130:2(93))
- Magaña-Hernández, F., Bá, K. M., & Guerra-Cobián, V. H. (2013). Estimación del hidrograma de crecientes con modelación determinística y precipitación derivada de radar. *Agrociencia*, 47(8), 739–752.
- Malekmohammadi, B., Zahraie, B., & Kerachian, R. (2010). A real-time operation optimization model for flood management in river-reservoir systems. *Natural Hazards*. <http://doi.org/10.1007/s11069-009-9442-8>
- Marín Rubís, À. (2006). *Clasificación de presas y evaluación del riesgo con programa HEC-RAS*. Universitat Politècnica de Catalunya.
- Martín Vide, J., & Olcina Cantos, J. (2001). *Climas y tiempos de España*. Alianza Editorial.
- Mata-Lima, H., Vargas, H., Carvalho, J., Gonçalves, M., Caetano, H., Marques, A., & Raminhos, C. (2007). Comportamento hidrológico de bacias hidrográficas: integração de métodos e aplicação a um estudo de caso. *Rem: Revista Escola de Minas*, 60(3), 525–536. <http://doi.org/10.1590/S0370-44672007000300014>

- Mckenroe, B. M., & Ph, D. (2010). Guidelines for Continuous Simulation of Streamflow in Johnson County , Kansas , with HEC-HMS Johnson County Public Works and Infrastructure. *Simulation*, (June).
- Milego, R. (2010). Usos i cobertes del sòl a les conques d'estudi . Caracterització i evolució 1993-2000-2005, 0–26. ACCUA.
- Ministerio de Medio Ambiente de España. (1996). *Clasificación de presas en Función del Riesgo Potencial - Guía Técnica*, 64.
- Ministry of Transportation and Highways. (1998). *Hydraulic Manual*. Province of British.
- Molnar, P. (2011). Calibration. *Watershed Modelling, Institute of Environmental Engi-Neering, Chair of Hydrology and Water Resources Management, ETH, Zürich, Switzerland*.
- Mulvany, T. J. (1851). *On the use of self-registering rain and flood gauges*.
- Nash, J. E., & Sutcliffe, J. V. (1970). River flow forecasting through conceptual models part I - A discussion of principles. *Journal of Hydrology*, 10(3), 282–290.
[http://doi.org/10.1016/0022-1694\(70\)90255-6](http://doi.org/10.1016/0022-1694(70)90255-6)
- Ninyerola, M., Pons, X., & Roure, J. M. (2000). A methodological approach of climatological modelling of air temperature and precipitation through GIS techniques. *International Journal of Climatology*, 20(14), 1823–1841. [http://doi.org/10.1002/1097-0088\(20001130\)20:14<1823::AID-JOC566>3.0.CO;2-B](http://doi.org/10.1002/1097-0088(20001130)20:14<1823::AID-JOC566>3.0.CO;2-B)
- Olivares, G., Tamoh, K., & Candela, L. (2000). Adaptabilidad de tres cuencas mediterráneas al cambio climático en Catalunya para el horizonte de predicción 2000-2050 .
- O'Loughlin Wayne; ; Chocat, Bernard, G. ; H. (2010). Rainfall-runoff processes and modelling. *Journal of Hydraulic Research*, 34, 733–751. <http://doi.org/10.1080/00221689609498447>
- Orduña, F. (2007). *Aplicaciones de software SIG: ArcGIS*. Universitat de Girona.
- Oreskes, N., Shrader-Frechette, K., & Belitz, K. (1994). Verification, Validation, and Confirmation of Numerical Models in the Earth Sciences. *Science*, 263(February), 641–646.
<http://doi.org/10.1126/science.263.5147.641>
- Pasini, F. (1914). *Relazione sul progettodella bonifica renana*. Bologna.
- Pla, E.; Pascual, E. (2012). ACCUA. Adaptacions al Canvi Climàtic en l'Ús de l'Aigua.
- Ponce, V. M. (1989). *Engineering Hydrology: Principles and Practices*. Prentice Hall. Retrieved from <https://books.google.co.kr/books?id=YNqtPQAACAAJ>

- Porro, C. A. (2009). *Efectos de escala en procesos hidrológicos: Aplicación a la cuenca del río Guadalfeo (Granada)* (Series monográficas. Tesis doctoral - Hidrología e Hidráulica Agrícola). Hidrología e Hidráulica Agrícola, Universidad de Córdoba. Retrieved from <https://books.google.co.kr/books?id=svElnwEACAAJ>
- Priestley, C. H. B., & Taylor, R. J. (1972). On the Assessment of Surface Heat Flux and Evaporation Using Large-Scale Parameters. *Monthly Weather Review*, 100(2), 81–92. [http://doi.org/10.1175/1520-0493\(1972\)100<0081:OTAOSH>2.3.CO;2](http://doi.org/10.1175/1520-0493(1972)100<0081:OTAOSH>2.3.CO;2)
- Rafaelli, S. (2003). *Paisaje erosivo en cuencas de montaña. Modelación con extrapolación espacial ascendente*. Doctorado en Ciencias de la Ingeniería, Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Matemáticas, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina.
- Raje, D., & Mujumdar, P. P. (2010). Reservoir performance under uncertainty in hydrologic impacts of climate change. *Advances in Water Resources*. <http://doi.org/10.1016/j.advwatres.2009.12.008>
- Rani, D., & Moreira, M. M. (2010). Simulation-optimization modeling: A survey and potential application in reservoir systems operation. *Water Resources Management*. <http://doi.org/10.1007/s11269-009-9488-0>
- Rani, D., & Moreira, M. M. (2010). Simulation-optimization modeling: A survey and potential application in reservoir systems operation. *Water Resources Management*. <http://doi.org/10.1007/s11269-009-9488-0>
- Refsgaard, J. C. (1997). Parameterisation, calibration and validation of distributed hydrological models. *Journal of Hydrology*. [http://doi.org/10.1016/S0022-1694\(96\)03329-X](http://doi.org/10.1016/S0022-1694(96)03329-X)
- Refsgaard, J. C., & Knudsen, J. (1996). Operational Validation and Intercomparison of Different Types of Hydrological Models. *Water Resources Research*, 32(7), 2189–2202. <http://doi.org/10.1029/96WR00896>
- Reichert, P., & Omlin, M. (1997). On the usefulness of overparameterized ecological models. *Ecological Modelling*. [http://doi.org/10.1016/S0304-3800\(96\)00043-9](http://doi.org/10.1016/S0304-3800(96)00043-9)
- Russel, S. O., Kenning, B. F. I., & Sunnell, G. J. (1979). Estimating design flows for urban drainage. *Journal of Hydraulics Division.*, 105(1), 43–52.
- Saravia A., R. G. (2002). Método Directo para el tránsito de avenidas en embalses. Bolivia: Universidad Privada Boliviana.
- Sherman. (1932). Streamflow from rainfall by the unit-graph method. *Engineering News Record*, 108.
- Singh, V. P. (1995). *Computer models of watershed hydrology*. Water Resources Publications. Retrieved from <https://books.google.co.kr/books?id=8XfuAAAAMAAJ>

- Starosolszky, O., & Melder, O. M. (2014). *Hydrology of Disasters: Proceedings of the World Meteorological Organization Technical Conference Held in Geneva, November 1988*. Taylor & Francis. Retrieved from <https://books.google.co.kr/books?id=niBpAwAAQBAJ>
- Tejada-Guibert, J. A., Johnson, S. A., & Stedinger, J. R. (1995). The Value of Hydrologic Information in Stochastic Dynamic Programming Models of a Multireservoir System. *Water Resources Research*, 31(10), 2571–2579. <http://doi.org/10.1029/95WR02172>
- Témez, J. R. *Cálculo hidrometeorológico de caudales máximos en pequeñas cuencas naturales* (1978). España: Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo.
- Tingo Maria. (2011). ArcGIS Básico. *Software*, 148.
- Tromble, J. M. (1983). Interception of rainfall by Tarbush. *Journal of Range Management*, 36(July 1963), 525–526.
- US Army Corps of Engineers. (2000). Hydrologic Modeling System HEC-HMS Technical Reference Manual. *US Army Corps of Engineers*, (March), 155. <http://doi.org/CDP-74B>
- Van Haveren, B. P., & American Water Works Association. (1986). *Water resource measurements: a handbook for hydrologists and engineers*. American Water Works Association.
- Vieux, B. E., Cui, Z., & Gaur, A. (2004). Evaluation of a physics-based distributed hydrologic model for flood forecasting. In *Journal of Hydrology* (Vol. 298, pp. 155–177). <http://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2004.03.035>
- Wagener, T., Wheeler, H. S., & Gupta, H. V. (2004). *Rainfall-Runoff Modelling in Gauged and Ungauged Catchments*. PUBLISHED BY IMPERIAL COLLEGE PRESS AND DISTRIBUTED BY WORLD SCIENTIFIC PUBLISHING CO. <http://doi.org/10.1142/p335>
- Xie, H., Chen, L., & Shen, Z. (2015). Assessment of Agricultural Best Management Practices Using Models: Current Issues and Future Perspectives. *Water*, 7(3), 1088–1108. <http://doi.org/10.3390/w7031088>
- Zhao, T., Cai, X., & Yang, D. (2011). Effect of streamflow forecast uncertainty on real-time reservoir operation. *Advances in Water Resources*. <http://doi.org/10.1016/j.advwatres.2011.01.004>
- Zinke, P. J. (1967). *Forest Iterception Studies in the United States*. *Forest Hydrology*.
- Zoch, R. T. (1934). On the relation between rainfall and stream flow. *Monthly Weather Review*, 62(9), 315–322. [http://doi.org/10.1175/1520-0493\(1934\)62<315:OTRBRA>2.0.CO;2](http://doi.org/10.1175/1520-0493(1934)62<315:OTRBRA>2.0.CO;2)

